

Vliv sušícího procesu na kvalitu vysoušení sádrového jádra



Miroslav Vávra

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav VÁVRA**
Osobní číslo: **T080254**
Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Vliv sušicího procesu na kvalitu vysoušení
sádrového jádra**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte studii týkající se sušících procesů zaměřených na sušení sádrových odlitků.
2. V teoretické části práce se seznamte s matematickými modely popisující sušící proces.
3. Experimentálně naměřte sušící křivky vzorku sádrových odlitků při vhodně zvolených parametrech sušení.
4. Na základě provedených měření navrhněte optimální režim sušení za účelem zkrácení doby operace při dodržení požadovaných technologických vlastností odlitku.
5. Výsledky zhodnoťte v závěru práce.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Kolomazník,K.:Teorie technologických procesů III, VUT Brno, FT Zlín, 1978

Kolomazník,K.:Modelování zpracovatelských procesů, VUT Brno, FT Zlín, 1990

Kolat,'P.:Přenos tepla a hmoty, FS, VŠB-TU Ostrava, 2001 Drábek,D.,Klepáč,P.:Procesné strojnictvo II, STU Bratislava,2000

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Dagmar Janáčová, CSc.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. února 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2011**

Ve Zlíně dne 4. ledna 2011



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihledne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Teoretická část je zaměřena na obecnou problematiku sušících pochodů, vlhkostí a vazeb ve hmotě. Dále zmiňuje historii výroby sádry, těžbu a její rozdělení. Následně navazuje na princip sušících zařízení, technický popis výroby hliníkových odlitků a v poslední řadě se zabývá konkrétním teoretickým matematickým modelem popisujícím sušící proces vztažený na desku, analogicky válec či kouli.

Praktická část je zaměřena na experimentální měření sušících křivek za účelem snížení technologického času. Naměřené sušící křivky byly porovnány s teoretickým průběhem sušících křivek na základě aplikovaného difúzního modelu popisujícího sušící děj. Pro výpočet a vykreslení teoretických sušících křivek byla využita již stávající programová aplikace vytvořená pro tyto účely na FAI UTB ve Zlíně.

Klíčová slova: sádra, sušící cyklus, matematický model, MATLAB

ABSTRACT

Theoretical part is focused on general problem of drying processes, humidity and bindings in the stuff. Furthermore, this part mentions also history of plaster production, its mining and division. Consequently follows principle of drying device, technical description production of aluminium castings and in the end this works deal with factual theoretical mathematical model describing drying process which is related to plate, analogously cylinder or globe.

Practical part is focused on experimental measurement of drying curves in order to short technological time. Measured drying curves were compared with theoretical running on base of applied diffusion model describing drying process. To calculate and project theoretical drying curves was used already existing programme application created for these purposes at FAI UTB in Zlín.

Keywords: plaster, drying process, mathematical model, MATLAB

Tímto chci poděkovat panu Ing. Slavomíru Hazuchovi, Ph.D za vstřícnou pomoc při experimentálních měřeních, s jejich umožněním ve výrobě a maximální podporou. Dále chci poděkovat všem svým spolupracovníkům za kamarádský postoj a podporu při zdolávání mého studia.

V neposlední a největší míře bych touto formou z celého svého srdce poděkoval vážené paní doc. Ing. Dagmar Janáčové, CSc. za její maximálně vstřícný a přátelský přístup, cenné informace a lidskost při vypracování bakalářské práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 LITERÁRNÍ STUDIE.....	12
1.1 SUŠÍCÍ PROCES	12
1.2 PROCES VÝROBY SÁDRY	18
1.3 IDENTIFIKAČNÍ LIST SÁDRA (THERMOMOLD).....	26
1.4 SUŠÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	27
1.5 TECHNICKÝ POPIS VÝROBY HLINÍKOVÉHO ODLITKU.....	30
1.6 MATEMATICKÝ MODEL SUŠÍCÍHO DĚJE	41
II PRAKTICKÁ ČÁST	44
2 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ.....	45
2.1 EXPERIMENTÁLNÍ POPIS SUŠÍCÍHO PROCESU SUŠENÍ SÁDROVÝCH JADER.....	45
2.2 POROVNÁNÍ SUŠÍCÍCH KŘIVEK S TEORETICKÝMI PRŮBĚHY SUŠÍCÍCH KŘIVEK NA ZÁKLADĚ POUŽITÉHO MATEMATICKÉHO MODELU	60
ZÁVĚR	65
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68
SEZNAM OBRÁZKŮ	69
SEZNAM TABULEK	71

ÚVOD

Téma své bakalářské práce jsem si vybral záměrně, neboť jsem názoru, že tato práce může pomoci firmě, kde pracuji, snížit náklady a možná i zvýšit efektivitu výroby hliníkových odlitků. Zaměřil jsem se na problematiku vlivu sušicího procesu s cílem efektivněji odstranit vlhkost v sádrovém jádru. Její nedostatečné odstranění je totiž příčinou vzniku některých vad. Vadou odlitku se rozumí každá odchylka rozměrů, hmotnosti z hlediska makrostruktury nebo jiných vlastností, které se liší od příslušných norem nebo technických podmínek. Jedná se zejména o vady zjevné (viditelné), které je možno zjistit při prohlídce neobrobeného odlitku prostým okem nebo jednoduchými měřidly, nebo skryté. Skryté vady je možno odhalit až za pomoci vhodných přístrojů, prorýsováním nebo laboratorními zkouškami. S tím značně souvisí snížení pracnosti při ručním opracování nežádoucích slévárenských vad a následné snížení nákladů na výrobu. Dle zkušeností podpořených praxí, jsou nežádoucí vícenáklady a jejich ruční odstranění hodně úzce spjato s možnou, a ne zcela úplně dostatečnou kvalitou vysoušení sádrového jádra. Na kvalitně vysušení sádrového jádra závisí následné získání finálního produktu, kterým je, jak jsem již uvedl hliníkový odlitek. Je jedním z pěti základních prvků pro výrobu automobilových forem sloužících k výrobě pneumatik pro osobní a dodávkové automobily.

Více než 11 let pracuji ve společnosti Barum Continental, která je jako mnoho jiných výrobních závodů součástí celosvětově působícího koncernu Continental AG. Continental se zabývá výrobou pneumatik pro osobní, nákladní a traktorové vozidla. Společnost Barum Continental je mimo přímé výroby pneumatik, také majoritním koncernovým dodavatelem forem na výrobu pneumatik pro osobní a dodávkové automobily. Tuto činnost zajišťuje divize Výroby forem Barum (VFB), tvořena oddělením výroby a oddělením oprav forem.

Divize VFB - výroby forem, obdržela mnoho ocenění. Koncernových PLT – MOLD – SUPPLIER OF THE YEAR 2010, ale i národních ocenění za kvalitu, např. Národní cena za jakost z roku 2003. Žádný s titulů se nezískává snadno a jeho obhajoba je o to složitější.

Právem se Divize VFB může pyšnit vysokou kvalitou výroby automobilových forem a hlavně jejich včasným dodáním zákazníkovi. Plnění těchto hlavních kritérií jsou hlavním mottem činnosti naší divize. Toto nás zavazuje a nutí se stále zamýšlet nad řešením a odstraňováním problémů, které vznikají špatným odlitím hliníkových polotovarů. Správnost odlití je úzce spjato i s kvalitou sádrových jader a jejich suchostí. Sádra ve své kašovitě konzistenci, má mnoho výhod. Zde patří například skvělé kopírovací schopnosti, zatéka-

vost a po správném vytunutí a vytvrdnutí i dobrá kvalita povrchu. Zpracování sádry má také svá úskalí jako například ne zcela kvalitním vysušení jádřince, nedostatečné odstranění vlhkosti z materiálu, nebo menší odolnost proti mechanickému poškození při výrobě. Vlivem špatného sušení nebo mechanického poškození sádrového jádra dochází na hliníkových segmentech k mnoha jak viditelným, tak i skrytým vadám. Viditelné vady (porozita, vysoké a nízké výronky na žebrech, mapy, řediny, zavaleniny a jiné) lze poměrně dobře, ale velice pracně, mechanicky odstranit.

Daleko horšími a mnohem pracnějšími na mechanické odstranění jsou vady skryté, na první pohled pouhým okem nepostřehnutelné. Mezi ně řadíme hlavně propadliny a vydutiny. Odhalení těchto vad je možné až výrobní kontrolou, kdy při měření ovality a konicity nám laserové měření ukáže, zda běhounová část dezénu je v požadované toleranci.

V současné době pracuji v divizi výroby forem v oddělení technické přípravy výroby (TPV) jako provozní technolog a částečně působím i v oddělení průmyslového inženýrství. Mým nynějším úkolem je řešit výrobní problémy a stanovovat technologické operace ručního a strojního obrábění hliníkových forem. Tyto mnou stanovené technologické operace ručního obrábění v mnohém řeší odstraňování vad způsobených nedokonalým zpracováním sádrových jader. Tyto ruční dokončovací operace snižují efektivitu a zvyšují náklady na výrobu forem. Po nedávné celosvětové hospodářské krizi a nuceném zeštíhlení výroby za stejného objemu práce jsou náklady na výrobu hliníkových odlitků ještě ožehavějším tématem.

Cílem této práce je eliminovat nedostatky spojené se suchostí sádrových jader, jejich sušením, zlepšením povrchových a mechanických vlastností, že je výrazným způsobem možno potenciálně snížit procento slévárenských vad na odlitcích a tím zefektivnit a zvýšit progresivitu celého výrobního procesu výroby hliníkových forem.

K objasnění zmíněné problematiky se v práci budu zabývat sušícími procesy, vztahy vlhkosti, procesem získávání sádry, jejím dělením a uplatněním v průmyslu.

K uvedení do problematiky je nutno popsat jednotlivé fáze výroby sádrových jader, a následně hliníkových forem. Je třeba poznat fyzikální a chemické procesy, jež při výrobě probíhají, vzájemně se ovlivňují a mají vliv na kvalitu finálního produktu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 LITERÁRNÍ STUDIE

1.1 Sušící proces

Sušení lze provádět dvěma způsoby, a to buď přirozeným, nebo řízeným. V prvním případě lze sušit materiál pod přístřeškem, na volném vzduchu, nebo na slunci. Toto je pravděpodobně nejstarší způsob konzervace, dodnes používaný pro celou řadu látek, například seno, ovoce, houby, předměty denní potřeby a jiné. Při stávajícím procesu se voda na povrchu odpařuje a difunduje do okolního vzduchu. Zdálo by se, že přirozený způsob sušení je ideální co do nákladů. Podrobí-li se proces ekonomické úvaze, zjistí se, že hospodářská výnosnost je ve většině případů sporná. Sice nárok na spotřebu energie odpadá, zato se zvyšují náklady na dopravu a manipulaci. S toho plynou i hlavní nevýhody přirozeného sušení, kterými jsou velmi malá rychlost sušení a potřeba velkých sušících prostorů. Z tohoto důvodu se všechny materiály suší průmyslově, v předem nastaveném režimu sušení. Ze zkušeností vyplývá, že výhody plynoucí se snížení spotřeby místa, snížení zásob a zrychlení celého sušícího děje převažují náklady vynaložené na spotřebu energií. [1]

Sušením se nazývá proces, při kterém se pomocí tepelné energie odstraňuje z materiálu vlhkost vypařováním a odváděním par, které se zároveň tvoří. Podle této definice se sušení zásadně neliší od vypařování, avšak ve skutečnosti je sušení proces difúzní, protože vlhkost přechází do okolí povrchovým vypařováním vlhkosti a difúzí vlhkosti z vnitřních vrstev na povrch materiálu. Průběh procesu sušení je určen hlavně odporem difúze odstraňované vlhkosti. [2] [11]

V praxi se nejčastěji setkáváme se „sušením v užším slova smyslu“, kdy je nutno odstraňovat vodu z pevné látky odpařováním do proudu předeřhátého vzduchu. Je to poměrně komplikovaný děj, při kterém současně dochází ke sdílení tepla a hmoty. Ke sdílení tepla potřebného k odpaření vody dochází v laboratorní sušárně výhradně konvekcí ze vzduchu do sušeného materiálu, což znamená, že je to přeměna kapaliny, převážně vody, v páru. [2]

Z hlediska sdílení hmoty je nutno chápat sušení, jak již bylo uvedeno, jako difúzní proces. Voda, která je v materiálu obsažena, bude v průběhu sušení přecházet z povrchu materiálu do proudu vzduchu (vnější difúze) a po jisté době, kdy se vytvoří gradient vlhkosti v materiálu, bude docházet k difúzi vody uvnitř materiálu směrem k jeho povrchu (vnitřní difúze). Rychlost pomalejšího z dějů pak určuje celkovou rychlost sušení.

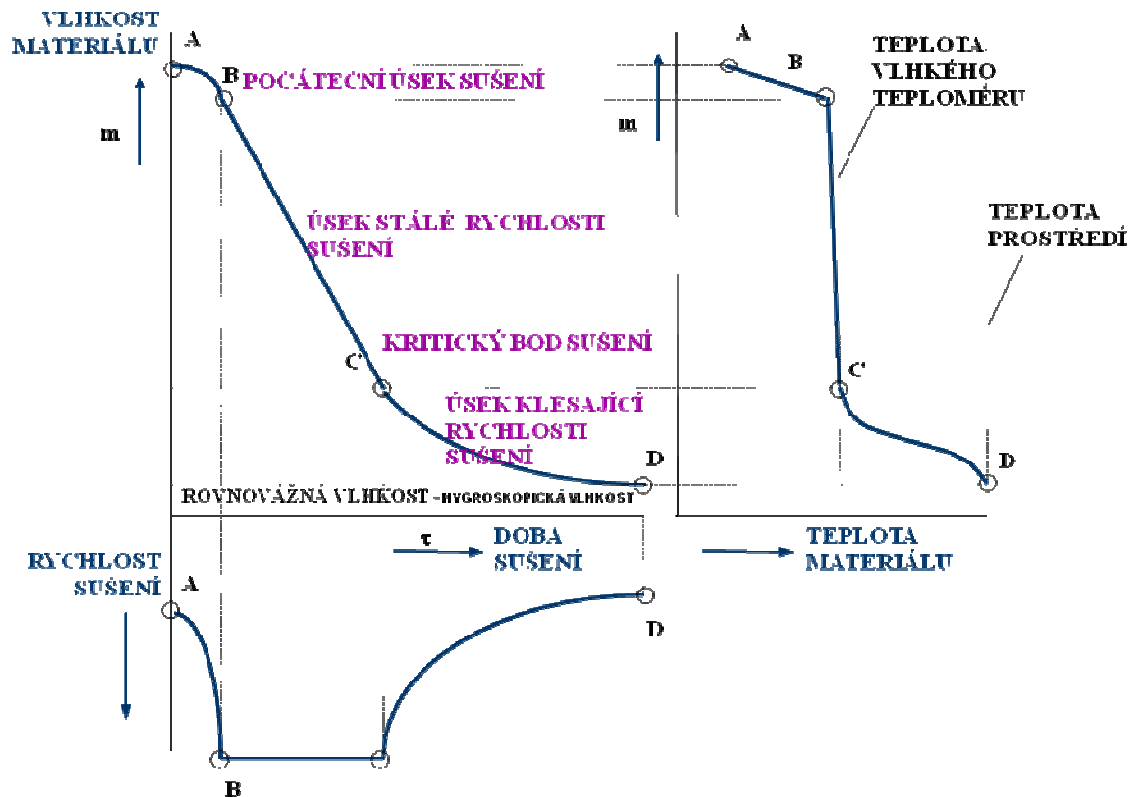
Pevná látka pro experimenty v laboratoři byla vybrána tak, aby na odstranění vody z vlhkého materiálu bylo třeba dodat pouze energii rovnou výparnému teplu vody (tzv. voda nevázaná). Z hlediska odstranitelnosti dělíme vlhkost na volnou, kterou lze v daných podmínkách odstranit, a na neodstranitelnou - rovnovážnou, která v materiálu zůstává i při nekonečně dlouhém sušení materiálu v daném prostředí (teplota, vlhkost), tj. je v rovnováze s obsahem vody ve vzduchu. Hodnota rovnovážné vlhkosti závisí na vlastnostech sušicího vzduchu a sušeného materiálu.

Jak bylo výše uvedeno, při sušení probíhá současně sdílení hmoty a sdílení tepla. Popis takového procesu je založen na popisu toho děje, na kterém nejvíce závisí celková rychlost procesu. U sušení je hybnou silou rozdíl parciálních tlaků vodní páry v obklopujícím prostředí a v mezní vrstvě. Mezní vrstvou se nazývá tenká vodní vrstva na povrchu sušeného materiálu, který se sytí vodní parou až do dosažení parciálního tlaku. Pomocí této hybné síly se pak vyjadřuje rychlost děje. [2] [11] [12]

Grafické vyjádření charakteristiky sušicího procesu nám ukazuje **sušící křivka**. Tato jedna ze základních charakteristik vyjadřuje změnu vlhkosti sušeného materiálu v závislosti na čase sušení. Za pomoci vzorků známé hmotnosti zjišťujeme v daných časových intervalech úbytek vlhkostí, ze kterých můžeme sestavit sušící křivku. Z této křivky lze získat první informace o průběhu sušicího procesu. Na druhé straně z pohledu kinetiky procesu sušení nám dává lepší a názornější přehled diagram rychlosti sušení, který nám vyjadřuje rychlost úbytku vlhkosti v materiálu v závislosti na čase.

Pro zvolené prostředí a předem zvolený typ pece, je třeba se zabývat sušením při konstantních podmínkách, což znamená, vodu, kterou je třeba z materiálu odstranit při sušení, je nutno rozdělit do dvou skupin, a to na vodu volnou a vázanou.

Volná voda se vyznačuje tím, že rychlost jejího odpařování z povrchu materiálu je stejná, jako rychlost odpařování z vodní hladiny, což znamená, že parciální tlak páry nad povrchem daného materiálu je roven parciálnímu tlaku páry nad vodní hladinou při téže teplotě. V druhém případě, voda hygroskopická, nebo taky voda vázaná vykazuje rychlost odpařování vždy menší, neboť její parciální tlak nad povrchem materiálu je proti prvnímu případu zmenšen silami, které vážou vodu v materiálu. To znamená, že vznikne nižší parciální tlak než nad vodní hladinou.



Obrázek 1 Sušící křivka [2]

Úsek A – B je úsekem ohřevu na odpařovací teplotu, který je v poměru k celkové době sušení tak krátký, že se často zanedbává. Úsek B - C je úsekem odpařování přímé vody s přímkovým průběhem, nazývaný úsek konstantní rychlosti sušení. Pokud je v materiálu dostatečné množství vody, je sušení určováno výhradně přenosem hmoty, což je odpařování vody z povrchu materiálu. Vlivem rozdílu parciálních tlaků voda difunduje z povrchu materiálu do sušícího plynu, v tomto případě do vzduchu. Čím je rozdíl parciálních tlaků větší, tím rychleji se voda z povrchu odpařuje. Na povrchu se sníží koncentrace vody na nižší hodnotu, než je tomu ve vrstvách pod povrchem. Proto se pohyb vody z vnitra materiálu děje tak rychle, že se mezní vrstva vody na povrchu stále obnovuje. Povrch sušeného materiálu zůstává tak dlouho vlhký, pokud vzlínavost kapilár stačí dodávat vodu k povrchu materiálu. V důsledku kapilarity je vzlínavost tím silnější, čím je průměr kapilár menší, takže bude při postupujícím sušení především ve velkých pórech klesat meniskus pod povrch a zatahovat se dovnitř. Omočená plocha povrchu se začne zmenšovat nejdříve o tyto plošky. Postupně se vyprazdňování konců kapilár rozšiřuje na menší póry, takže omočená plocha se zmenšuje. V poslední části tohoto úseku nemůže být,

přesně vzato, rychlost sušení konstantní, ale výše uvedené vlivy jsou v této fázi tak malé, nemají praktický význam.

Tento úsek konstantní rychlosti sušení trvá až do bodu **C**, nazývaného **kritický bod**, kterému odpovídá i kritická vlhkost.

Za kritickým bodem následuje úsek **C – D**, ve kterém se odpařuje vázaná vody, nazývaný též **úsek klesající rychlosti sušení**. Na tomto úseku se rychlost sušení zpomaluje z důvodu nedostatečného přivádění vlhkosti z vnitřních vrstev. V tomto úseku je průběh rychlosti sušení ovlivňován více rozdělením vlhkosti v materiálu, než parametry vzduchu, proudícího podél povrchu. Odpor při přenosu hmoty (vodní páry) mezi povrchem materiálu a vzduchem je v této fázi zanedbatelný, proti odporu způsobenému silami zadržující vodu v materiálu. Jsou to zejména síly kapilární, difuzní a koloidní.

Protože je v oblasti za kritickým bodem sušení ovládáno jinými fyzikálními podmínkami než v pásmu **B – C**, je znalost polohy kritického bodu velmi důležitá pro posouzení a účelné vedení sušicího procesu. Proto posunutím kritického bodu ve směru zmenšující se vlhkosti je vcelku výhodné, neboť se prodlouží pásmo konstantní rychlosti sušení. Tohoto lze docílit především zmenšením rozměrů (v tomto případě nevhodné), nebo zlepšením rovnoměrnosti sušení, které zabrání vytvoření přeschlé povrchové kůry.

Pro lepší pochopení procesu sušení je nutno se seznámit s vazbami vlhkosti ve hmotě, jejich dělením a důležitostmi sorbčních izoterem. [1] [12] [13]

Vazba vlhkosti ve hmotě

Sušení kapilárně porézních, koloidních materiálů je složitý tepelně fyzikální chemický proces, jehož zákonitosti jsou především určeny vazbou vlhkosti se skeletem vlhkého materiálu. Pro odstranění vlhkosti z materiálu je třeba tyto vazby porušit. K porušení vazeb je potřeba energie (nazýváme ji vazebnou energií), kterou je nutno dodat do procesu sušení. [2]

Dělení vazeb lze třídit v závislosti na hodnotě vazebné energie vlhkosti s tuhým materiálem.

Dělení vazeb

Z hlediska vlhkosti v materiálu dělíme vazby na **vazbu hydratační (iontová molekulová)**, která je chemicky vázaná, je součástí molekul a její odstranění je nevratný proces. Dále pak vazby dělíme na **kapilární (adsorpční, osmotická struktura)**, tyto vyplňují kapilární prostory a jejich odstranění má za následek změnu vlastností materiálu, jako je pružnost, tažnost a plasticita. V poslední řadě je to vazba **adsorbovaná**, jež se nachází v **mikrokapilárních a v makrokapilárních strukturách** a vyplňuje velké mezivláknité prostory. [2]

Schéma typů vazeb vlhkosti navrhl Rebinder, teprve v poslední době byly však vypracovány metody experimentálního stanovení jednotlivých vazebných forem vlhkosti materiálu. Jednou z těchto metod je metoda termogramu sušení (poprvé použita Kazanským). O těchto vědcích se zmiňuje již prof. Kolomazník v publikaci „Teorie technologických procesů III“.

Metoda je založena na poznatku, že uvolnění vlhkosti se skeletem materiálu je možné pouze po dodání energie rovnající se energii právě uvolněné vazby. Porušení vazby je endotermickou reakcí, jenž se musí projevit změnou střední teploty materiálu umístěného např. v prostředí o konstantní teplotě. Principem určování vazby vlhkosti ve hmotě pomocí termogramu sušení je tak současný zápis časového rozdílu střední teploty vzorku a teploty okolí a teploty úbytku hmotnosti vzorku, vysoušeného v normativních konstantních parametrech. [3]

Rovnovážná vlhkost

Daný materiál v převážné části strukturně porézní povahy uložen do vlhkého vzduchu konstantních parametrů má po určité době neměnný obsah vlhkosti, nazývaný rovnovážnou měrnou vlhkostí. Je charakterizován tím, že nedochází k látkové ani tepelné výměně mezi vzorkem a okolím. Ve stavu rovnovážné vlhkosti dochází k vyrovnání parciálního tlaku páry v materiálu s parciálním tlakem páry obsažené v okolí. Rovnovážné vlhkosti, získané jako rovnovážné stavy Rovnovážné vlhkosti, získané v prostředí, jehož vlhkost se zvyšuje při zachování stálé teploty, vytváří křivku sorpční izotermy. [2] [3]

Přirozený přechod k rovnovážnému stavu vlhkosti je velmi pomalý a závisí na mnoha faktorech. V případě porézně – kapilárních materiálů jsou to následující faktory. V první řadě druhem porézních materiálů, jejíž struktura je určena základními geometrickými

charakteristikami a to objemem (pórovitost), rozměrem, distribucí a tvarem pórů a měrným povrchem. Tvar pórů může být otevřený, otevřený spojitý (beton, cihly, pórobeton) a uzavřený (nenasákové, slinitý keramický stěp, polystyren). Dalšími faktory je způsob předchozí technologie zpracování materiálu, druhy použitých přísad, obsah vlhkosti plynné fáze, rychlostí proudění plynné fáze kolem výrobku, teplotou okolí, termodynamickými parametry plynné fáze a naposled homogenitou podle rozložení bílkoviny hmoty (toto pouze u přírodních materiálů, kterými se již dále nebudeme zabývat).

Dalším ukazatelem rovnovážného stavu je níže uvedená

Důležitost sorpčních a desorpčních izoterm, které nám udávají závislost parciálního tlaku vodní páry ve vzorku na měrné vlhkosti, dále pak ovlivňují hodnoty konečné vlhkosti vzorků se zřetelem na další zpracování a umožňují modifikovat podobnostní kritéria, charakterizující přestup tepla a hmoty.

Sorpce nazýváme zachycování složky kapalně či plynně směsi (sorbátu) na povrchu tuhé fáze (sorbentu) vlivem buď chemických vazebných sil (chemisorpce), nebo sil nevázebné interakce (adsorpce). Užívá se k oddělování složek ze směsí, kdežto desorpce nazýváme pochod opačný k adsorpci, to znamená odpoutávání adsorbovaných molekul z fázového rozhraní a jejich přechod do objemové fáze.

Mezi další způsoby odstranění vlhkosti patří **mechanické odstranění vlhkosti**, které se provádí lisováním, vysáváním, filtrováním a odstředováním. Těchto způsobů se používá k odvodňování materiálu tehdy, není-li třeba vlhkost odstranit úplně. Dalším způsobem je odstranění vlhkosti **fyzikálně chemické**. Provádí se pohlcením vlhkosti hygroskopickými látkami, např. chloridem vápenatým, kyselinou sírovou. Fyzikálně chemické způsoby sušení jsou poměrně drahé a složité, používá se jich hlavně k odstranění vlhkosti z plynů. **Tepelné odstranění vlhkosti** se provádí vypařováním, odpařováním a kondenzací. Mimo jiné se zde řadí i **sušení**. Používání těchto způsobů je rozšířeno hlavně při zpracování materiálu, z něhož je třeba vlhkost odstranit téměř úplně. A posledním způsobem na odstranění vlhkosti je **vymrazování**, nebo také **sublimace**. Při odstranění vlhkosti z materiálu pomocí vymrazování se nejdříve podchladí materiál na nízkou teplotu. Vlhkost obsažená v materiálu se vlivem nízké teploty změní na led. Poté dochází k odstranění přebytečné vlhkosti ve formě ledových krystalů sublimací. [2]

1.2 Proces výroby sádry

Historie sádry

Sádra patří mezi látky rozpuštěné v mořské vodě. Během mnoha let se vytvořila falešná mořská dna. Díky odpaření vody se v těchto místech uchoval i sádrovec. Ve střední Evropě před 210 - 110 miliony let vznikly velké zásoby sádry. Pokud se tvořily nánosy, došlo k překrývání a sádrovec se dostával níž a níž a díky vyššímu tlaku a rostoucí teplotě došlo k odbourání krystalické vody a vznikl Anhydrit (bezvodý CaSO_4). Takto vznikly přírodní zásoby sádrovce a anhydritu, které se nachází v hloubce od 2 do 70 m, které se dnes využívají. [14]

Surovinové zdroje v ČR

Ložiska sádrovce v ČR jsou vázána na miocenní (baden – wieliczkien) sedimenty opavské pánve, která se nachází na karpatské předhlubně. Její větší část produktivního badenu leží na polské straně. Průměrný obsah sádrovce v surovině je mezi 70 – 80 %. Těžba na Opavsku probíhala prakticky nepřetržitě v různých lokalitách od poloviny 19 století. V současné době je těženo pouze jedno ložisko a to v Kobeřicích jedinou těžební organizací Gypsum s.r.o., Kobeřice.

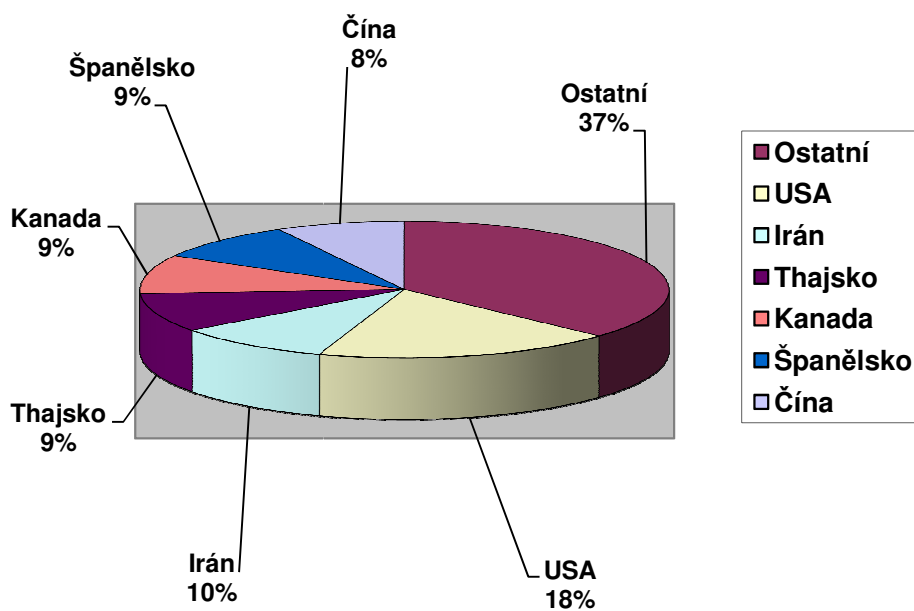
Světová těžba sádrovce

Světová těžba sádrovce (včetně anhydritu) se dlouhodobě pohybovala v rozmezí 80 000 a 100 000 kt a dosáhla svého vrcholu ve statisticky uzavřeném roce 1995 (96141 kt). Těžba je úzce spojena se stavební činností, jejíž největší pokles po roce 1989 se projevil i v přechodném snížení těžby. Na těžbě se podílely především tyto státy (podle Welt-Bergbau-Daten a Mineral Commodity). [15]

Použití sádry

Má široké uplatnění především ve výrobě stavebních hmot. Používá se k výrobě sárokartonů z energosárovce, při štukatérských a sochařských pracích k výrobě forem, odlévání modelů a reliéfů. Používá se jako přísada do omítek a vápenných malt. Má výborné protipožární vlastnosti, činně ovlivňuje vlhkost vzduchu a udržuje stabilní teplotu. Je výji-

mečná i z hlediska zdravotní bezpečnosti. V kontaktu s pokožkou se chová šetrně. Má stejnou hodnotu pH jako lidské kůže a také stejnou propustnost pro difuzi vodní páry. Nevysušuje ji, ani nezatěžuje přílišnou vlhkostí. Proto je hojně využívána v medicíně pro kontaktní tuhé fixační obvazy. [16]



Obrázek 2 Světová ložiska a producenti sádry

Rozdělení sádry podle typu

Název	β-polohydráty		α-polohydráty		
	Typ I (otiskovací sádra)	Typ II (alabastrová sádra)	Typ III (hydrokaly)	Typ IV (denzity/stone)	Typ V (stone)
Poměr míchání prášek (g)	100	100	100	100	100
voda (ml)	40 - 70	60	28 - 32	22 - 23	18 - 20
Doba zpracování (min)	-	6 - 7	4 - 7	5 - 6	-
Doba tuhnutí (min)	4	12 - 14	8 - 14	10	12 - 16
Pevnost (MPa)	4	9	20,7	34,5	48,3
Expanze při tuhnutí (%)	0,15	0,1	0,14 - 0,20	0,1	0,1 - 0,3

Tabulka 1 Rozdělení sádry podle typu [17]

Rozdělení sádry podle použití

Použití	
Typ I	Předběžné otisky pro laboratorní výrobu celkových snímatelných náhrad, připevňování modelů do artikulačního přístroje
Typ II	Zhotovování předběžných, situačních modelů, připojování pracovního modelu do artikulátoru (např. Při zpracování selopláštové lité korunky)
Typ III	Zhotovování pracovních modelů bez nutnosti maximální pevnosti a nízkého otěru
Typ VI	Přesné a namáhané práce v laboratoři
Typ VI	Modely pro tvorbu inlejí a náhrad ze slitin obecných kovů (používá se, aby vyrovnávala jejich kontrakci)

*Tabulka 2 Rozdělení sádry podle použití [17]***Rozdělení sádry podle získávání se dostávají přírodní sádrovec a energosádrovec****Přírodní sádrovec**

Sádrovec je sedimentární hornina, složená z podstatné části nebo úplně z monoklinického minerálu sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), který je zpravidla bezbarvý až bílý. Hornina bývá často znečištěna příměsemi (jílovité, písčité, železité, vápenec, dolomit, anhydrit aj.). Naprostá většina ložisek sádrovce vznikla odpařováním mořské nebo jezerní vody a následnou krystalizací sádrovce (často s anhydritem) v aridních oblastech. Ložiska vzniklá jinými způsoby (např. hydratací anhydritu, rozkladem sulfidů, metasomaticky atd.) mají malý význam. Anhydrit (bezvodý CaSO_4) se zařazuje často pod sádrovec. Do podoby sádrovce je běžně převáděn pomocí mokrého mletí. Světové ložiskové zásoby sádrovce se v současnosti odhadují na 2,6 mld. t.

Sádrovec se používá nejčastěji v průmyslu stavebních hmot - výroba sádry, cementu, omítkovin a prefabrikátů - a malé množství k jiným účelům (v zemědělství, při výrobě skla, papíru, ve farmacii a také jako plnivo). [15]

Energosádrovec

Kvůli snížení oxidu siřičitého v ovzduší došlo k odsíření tepelných elektráren a jiných zařízení. Jedna z nejdůležitějších metod k odsíření je vápenná lázeň. Při tomto procesu vzniká jako vedlejší produkt odsíření sádra. Takto vzniklá sádra se nazývá energosádrovec.

Je mnoho důvodů pro použití energosádrovce, neboť nezpůsobuje změny krajiny jako těžba přírodního sádrovce, jeho využitím se snižují náklady na ochranu životního prostředí, je to znovupoužitelný recyklát a v poslední řadě odpadají problémy s odstraněním vedlejšího produktu odsířování. Průzkumy firem, které využívají energosádrovec, došly k názoru, že obsahuje menší množství nečistot než sádrovec přírodní.

Sádra je hemihydrát síranu vápenatého $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$

Výroba: $2\text{CaSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}$

Hydratace: $2\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Termínem pojiva se označují látky, které lze upravit do tekuté nebo kašovitě formy a které pak z této formy relativně snadno přecházejí do formy pevné. V důsledku tohoto procesu mají pojiva schopnost spojit nesoudržná zrna nebo kusy různých látek v soudržnou, kompaktní hmotu. Proces zpevňování lze rozdělit na dvě na sebe navazující stadia - tuhnutí a tvrdnutí. Ve fázi tuhnutí ztrácí tekutá nebo kašovitá hmota svoji původní zpracovatelnost a postupně nabývá charakteru pevné látky. Ve fázi tvrdnutí pak vzniklá pevná látka postupně získává vyšší pevnost, která je potřebná při praktickém použití pojiva v konkrétní stavební aplikaci.

Anorganická pojiva lze rozdělit na:

- pojiva mechanická – během procesů tuhnutí a tvrdnutí nedochází u těchto pojiv ke změně chemické podstaty látky (např. jíly a hlíny),
- pojiva chemická – během procesů tuhnutí a tvrdnutí se odehrávají chemické reakce a dochází ke vzniku nových minerálních fází, resp. nových chemických sloučenin.

Chemická pojiva založená na anorganické bázi pak lze, podle prostředí, v němž dochází k tuhnutí a tvrdnutí a podle jejich stálosti ve vodném prostředí rozdělit na:

- pojiva vzdušná – k jejich vytvrzení dochází pouze na vzduchu, avšak ani po dokonalém vytvrzení nejsou tato pojiva zcela odolná vůči vodě (sádra a síranová pojiva, hořečnaté pojivo, vzdušné vápno).

Sádra a další typy síranových pojiv patří mezi vzdušné maltoviny. Základem těchto pojiv jsou různé formy síranu vápenatého (CaSO_4), proto někdy bývá tato skupina označována také jako vápeno-síranová pojiva.

Výroba sádry

Sádro je možno vyrábět několika technologickými postupy. Konkrétní výrobní postup a zařízení se volí podle toho, jaké budou požadavky na vyrobenou maltovinu a jaké suroviny jsou k dispozici. Před výpalem suroviny je zpravidla natěžená hornina podrcena a uložena v zásobnících. Ke kalcinaci (dehydrataci) sádrovce může docházet např. v:

- **sušících rotačních mlýnech**, v nichž se surovina mele a současně kalcinuje procházejícím teplým vzduchem (používá se zejména pro výrobu rychle tuhnutího β -hemihydrátu),
- **rotačních pecích** s přímým nebo nepřímým zahříváním, vytápěných plynem nebo olejem,
- **šachtových pecích** při teplotách 800 až 1000 °C (tento způsob slouží k výrobě pomalu tuhnutí sádry),
- tzv. **vařácích** – kovových kotlích o objemu 5 – 15 m³, které jsou opatřeny míchadlem a v nichž se pomletý sádrovec za přívodu tepla míchá a unikající pára nakypřuje („vaří“) vznikající sádro; teplota suroviny dosahuje 130 – 150 °C (jedná se o starší, periodický způsob výroby),
- **autoklávech**, které pracují s přetlakem při teplotě okolo 120 °C (jde o ekonomicky velmi nákladný postup, který ale produkuje nejkvalitnější α -sádro). [18]

Sádra se vyrábí termickým rozkladem **sádrovce** takzvaným vařákovým způsobem při 180 °C. Materiálem pro výrobu může být také odpad po odsíření spalin z tepelných elektráren (energetický sádrovec).

Přidáním vody do pohydrátového prášku začne směs tuhnut. Protáhlé špičaté krystalky se zvětšují a navzájem se proplétají. Nejdříve ztuhne na mazlavou hmotu a později hmota ztvdne. Po přidání vody do pohydrátového prášku nejdříve vznikne nasycený roztok. V tomto roztoku se polohydrát změní na dihydrát, který následně vykrytalizuje. Tento proces se děje do té doby než hmota úplně neztvdne. Během dvou dní má tato ztvdlá hmota pevnost tlaku 5 MPa. Po naprostém vysušení vody (přibližně 7 dní) má pevnost 10 MPa. Podle toho jak vyrábíme sádro a podle toho jaké přísady dáme při jejím tuhnutí, můžeme docílit rozličných výsledných produktů. Mají různou tvrdost, rychlost tuhnutí a barvu. Můžeme ovlivnit rychlost, při které bude sádra tuhnut. Urychlení může nastat například: ponecháním zbytků ztuhlé sádry v mísícím kelímku, přidáním teplejší vody do 37 °C, přidáním více sádry a menší množství vody, přidáním kuchyňské soli. Prodloužení doby tuhnutí nám způsobují organické kyseliny a jejich soli. Je to například: krev, želatina, agar, více studené vody a méně sádry. [10]

Sádra má všestranné využití ve stavebnictví, při drobných opravách v domácnosti, na instalátérské práce, opravy omítek, při výrobě kopií různých předmětů (zubní lékařství) atd. Pro stavební účely se ze sádry vyrábí sádrokarton a sádrovice, což je sádrová příčka.

Podle podmínek při výrobě sádry a přísad při jejím tuhnutí, které trvá nejčastěji asi 1–2 minuty lze docílit celé škály výsledných produktů s různou tvrdostí, rychlostí tuhnutí, barvou apod.

Sádra byla známá jako vynikající stavební materiál již Římanům. Přišli na to, že ji lze získat žháním sádrovce při pouhých 300 °C.

Rozdělení sádry podle doby tuhnutí

Druh	Počátek tuhnutí	Doba tuhnutí	Změna objemu
A – rychletuhnoucí	2 min	15 min	+1 %
B – normálnětuhnoucí	6 min	30 min	+1 %
C – pomalutuhnoucí	20 min	90 min	+2 %

Tabulka 3 Rozdělení sádry podle doby tuhnutí [17]

Pro snížení roztažnosti sádry se využívá vápenná voda, ale roztažnost nelze úplně odstranit. Rychlost tuhnutí také ovlivňuje teplota vody, kyselost a zásaditost vody.

Pro výrobu sádry je důležité, abychom znali pár důležitých údajů. Při zahřátí v suchém vzduchu 95 °C – 100 °C vzniká beta – polohydrát. Tento proces se nazývá suchá dehydratace. Alfa – polohydrát vzniká díky tlaku páry. při teplotách nad 45 °C vzniká v kyselinách a při teplotách nad 97,2 °C vzniká pod tlakem ve vodě. Tento proces se nazývá mokrá dehydratace. V obou dvou procesích ztrácí dihydrát až čtvrtinu vody. Základní surovinou pro výrobu sádry je sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Sádrovec se v přírodě nalezneme jako minerál. Pro výrobu sádry můžeme také použít vedlejší upravený produkt z chemických a energetických provozů.

Alfa – polohydrát

Vyrábí se mokrou dehydratací. V autoklávech, které jsou vyhřáté na 130 °C se za 4 hodiny dosáhne tlaku 0,4 – 0,5 MPa. Pak se hotový alfa – polohydrát začne ihned sušit při 105 °C a pak se namele. Vlastnosti alfa – polohydrátu se dají částečně ovlivnit a to díky tlaku nebo způsobu a teplotě při které se suší.

Alfa – polohydrát má drobné, dobře vyvinuté jehličkovité krystalky. Ty jsou bez poruch a proto, má ztuhlá sádra mnohem vyšší pevnosti.

Beta – polohydrát

Vyrábí se suchou dehydratací. Rozemletý sádrovec ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se dává pálit do otevřených nádob. Pálí se při teplotách 120 °C – 180 °C. Krystalky sádrovce se při vypalování poškodí kvůli unikající páře z krystalové vody.

Beta - polohydrát má velmi nepravidelné krystalky s mnoha póry a trhlinkami. Ty vznikly při pálení sádrovce. Krystalky jsou neuspořádané s velkou povrchovou energií a poměrně velkým povrchem. To vede k větší pórovitosti zatuhlé sádry a proto má při ztuhnutí nižší pevnost. Ve srovnání s alfa sádrou má beta větší rozpustnost a uvolňuje při tuhnutí více tepla. [19]

Rozdělení sádry podle vlastností

Vlastnost	α - hemihydrát	β - hemihydrát
teplota vzniku (°C)	115	107
teplota dehydratace (°C)	200 - 210	170 - 180
hustota (kg·m ⁻³)	2,72 - 2,73	2,67 - 2,68
velikost částic (μm)	10 - 20	1 - 5
porosita částic	není porézní	je porézní
měrný povrch	menší	větší
doba dehydratace podle vývinu tepla (min.)	17 - 20	7 - 12
objemové zvětšení (střední)	0,0028	0,0016
začátek tuhnutí (min.)	6,5	24
doba tuhnutí (min.)	9	30
pevnost v tahu za ohybu po 1 hod. v/s = 0,7 (MPa)	4,2	2,6
pevnost v tahu za ohybu po 1 hod. v/s = 1,7 (MPa)	2,4	1,6
pevnost v tahu za ohybu po vysoušení v/s = 0,7 (MPa)	6,2	4,2
pevnost v tahu za ohybu po vysoušení v/s = 1,0 (MPa)	3,6	2,6
pevnost v tlaku po 1 hod. v/s = 0,7 (MPa)	8,4	6
pevnost v tlaku po 1 hod. v/s = 1,0 (MPa)	4,7	3,2
pevnost v tlaku po vysoušení v/s = 0,7 (MPa)	15,5	12,6

Tabulka 4 Rozdělení sádry podle vlastností [18]

Rehydratace – tuhnutí sádry, je proces, při kterém se sádra přemění na sádrovec. Rehydrataci můžeme označovat jako exotermickou reakci při které se sádra zahřívá a zvětšuje svůj objem. Expanze je 0,15 – 0,7 % Hydroskopická expanze (když ztuhlou sádro poka-peme vodou) může být větší než 1,5 %. [18]

1.3 Identifikační list sádry (Thermomold)

Daný materiál je vysoce dostupný pro odlévání hliníkových slitin. Výrobek umožňuje výrobcům forem odlévat komplikované tvary. Produkt obsahuje malé množství organických částic, které způsobují nerizikové použití pro dané formy. Zacházení s výrobkem je jednoduché a vytváří formy s dobrým povrchem, rozměrovou přesností a nezpůsobuje u odlitků vady, které vyžadují následné opravy.

Aplikace

Produkt se používá pro výrobu forem, určených k odlévání dílů z hliníkových slitin, které vyžadují dobrý povrch a přesné detaily.

Typické použití:

- hliníkové odlitky pro modelování
- hliníkové odlitky v pneumatickém průmyslu
- hliníkové odlitky v obuvnickém průmyslu

Technická data

Technická data jsou pouze obecná, pro bližší detaily, kontakt spol. VPB

Poměr sádra /voda	100/90
doba rozpuštění	1 min
rychlost míchání	2000 až 2500 ot/min
mixovací čas	2 až 3 min
teplota vody	20 °C
doba zpracování	4 až 6 min
doba tvrdnutí	30 až 45 min

Maximální lineární smrštění po 2. hodinách je asi <0,08%

Minimální pevnost po 2. hodinách 1,06 MN/m²

Poměr sádry a vody je doporučen testy a není nutné jej použít v praxi. Přesné složení může být určeno dle individuálních aplikací. Změna poměru způsobí jiné hodnoty smrštění a pevnosti.

Pro sušení může být použita konvekční sušárna s / bez proudění ohřátého vzduchu. Vynucené proudění urychlí sušení a zkrátí čas sušení. Před litím kovů do formy, sádra musí být suchá a bez vlhkosti, jinak zůstatková voda vytvoří páru a ta tvoří vady na povrchu odlitku.

Je nutné zajistit, aby všechna volná a chemicky vázaná voda byla odstraněna. Teplota a čas sušení, bude záviset na sušícím zařízení a rozměru formy.

Změna barvy bílé sádry na hnědou během sušení, je normální, je způsobena zplynováním částic, proces není škodlivý a jedná se o obvyklý jev.

1.4 Sušící zařízení

Sušárny jsou v podstatě zařízení, které snižují obsah těkavých složek v sušeném materiálu. Nejčastěji jde o snižování obsahu vlhkosti, nebo také rozpouštěděl. Sklon k navlhání lze charakterizovat obsahem tzv. rovnovážné vlhkosti, což je obsah vlhkosti, který za daných vnějších podmínek již nezávisí na čase.

Na průběhu sušení daného materiálu má vliv více faktorů. Počítáme k nim zejména druh sušícího prostředí, pracovní tlak a způsob sdílení tepla mezi prostředím a sušeným materiálem.

Jak je patrné, požadavky na proces sušení i možnosti jeho realizace jsou mnohознаčné, což vedlo ke stavbě mnoha různých typů sušáren, které se dělí podle jejich provozu na sušárny cyklické a kontinuální.

Dále pak se sušárny dělí podle přívodu tepla na sušárny s konvekčním přívodem tepla, kondukčním přívodem tepla, sušárny se sálavým přívodem tepla a sušárny s vysokofrekvenčním ohřevem.

Sušárny s konvekčním přívodem tepla

V sušárnách, kde se teplo potřebné k odpaření vlhkosti sděluje konvekcí, se nejčastěji využívá vzduch, někdy též inertní plyn nebo spaliny. Proudící plyn, nazývaný taky sušící prostředí, se zároveň sytí vlhkostí se sušeného materiálu a odvádí ji mimo sušící prostor. Charakteristika sušícího prostředí, což je počáteční a konečný obsah vlhkosti, teplota, rychlost a směr proudění, obsah nečistot a jiné, ovlivňují jakost sušeného produktu. Zde se suší materiály vločkovité, zrnité, vláknité. Tento způsob odstraňování vlhkosti se nazývá sušení v nehybné vrstvě. Podle typu a konstrukce se zde řadí sušárny s mechanicky promíchanou vrstvou (bubnové sušárny), sušárny s vibrační čeřenou vrstvou, fluidní sušárny, proudové sušárny a rozprašovací sušárny.

Sušárny pro sušení plošných materiálů, které lze dělit podle druhu sušícího prostředí a podle způsobu obtékání sušeného materiálu sušícím prostředím a to na:

a) sušárny teplovzdušné – významným parametrem je teplota, která souvisí s kvalitou sušeného produktu zvláště u termosenzibilních materiálů

b) sušárny dle tří způsobů obtékání vsázkových materiálů:

- podélné - nedostatkem je pokles intenzity odpařování po délce obtékání, způsobený postupným syčením sušícího prostředí odpařenou vlhkostí, jakož i nerovnoměrnost sušení, která je způsobena nerovnoměrným rychlostním a teplotním profilem v příčném průřezu sušárny
- příčné - umožňuje vyšší intenzitu odpařování a menší nerovnoměrnost podél i napříč vysoušeného materiálu
- tryskové - zde se porušuje mezní vrstva a vytváří se krátké dráhy obtékání, což má za následek zvýšený přestup tepla a hmoty, jakož i rovnoměrnější ohřev sušeného materiálu.

Firma Barum Continental s.r.o. a její strojírenský závod VFB (výroba forem Barum) používá na sušení sádrových jader tyto typy sušících pecí. Prvním typem je elektrická odporová recirkulační pec, typ MIWY calor S, model N 6 r. Dalším typem je sušící pec firmy ZEZ Praha, a.s. Lambda 1,7 -2,1 – 1,5/50-250. Třetím typem je sušící zařízení německé firmy ERNST REINHARDT GMBH Maschinenbau, typ DÜT 260. Všechny tři typy sušících pecí splňují požadavky na sušení vlhkých sádrových jader. Pece

jsou určeny pro tepelné procesy, u kterých nedochází k vyvíjení par, které ve směsi se vzduchem jsou hořlavé a výbušné a nevznikají toxické koncentrace. Pece nejsou určeny k sušení sypkých látek, neboť proudem cirkulujícího horkého vzduchu by došlo k rozprášení vsázky. Pece pracují v rozsahu teplot od 50 – 400 °C.

Popis pece

Pece se skládají z kostry, oběhové vložky, dveří, tepelné izolace, topných těles, ventilátorů, větracích komínů a elektrického zařízení.

Kostra pece je zhotovena s ocelových plechů a profilů na nichž jsou z vnitřní strany umístěny ocelové oběhové vložky, které rozvádí rovnoměrně ohřátý vzduch z ventilátorů přes topná tělesa a rozptylové clony do prostoru pece. Teplo je předáváno do pracovního prostoru sáláním stěn oběhové vložky a konvekcí při proudění horkého vzduchu, který je dopravován úplnou recirkulací přes topné registry ve stěnách zpět do oběhové vložky. Tepelná izolace je umístěna mezi vnější ocelovou částí a vnitřní oběhovou vložkou. Její funkcí je zabránit prostupu tepla z pracovního prostoru pece do vnějšího prostředí a je vyrobena z kompozitních materiálů. Ventilátory zajišťují oběh a výměnu vzduchu v peci a jsou zpravidla umístěny v zadní části pracovního prostoru. Větrací komínky v horní části pece zajišťují výměnu vzduchu pomocí regulovatelných klapek. Celá sušící pec je ovládána elektronicky pomocí mnoha snímacích čidel a regulátorů, jejichž chod je zabezpečen softwarovou podporou firmy Moravské přístroje a.s. [9] [10]

Sušárny s kondukčním přívodem tepla

V sušárnách s kondukčním přívodem tepla se sušený materiál stýká přímo s ohřívajícími stěnami. Páry vzniklé odpařením se odvádějí vzduchem, který proudí nad vrstvou vysoušeného materiálu. Ohřev zde bývá nejčastěji parní. Sušení může probíhat za atmosférického nebo sníženého tlaku.

Sušárny se sálavým přívodem tepla

Používají se k sušení tenkých vrstev, ochranných povlaků atd. U těchto sušáren se potřebné teplo sděluje sušenému materiálu sáláním od zdrojů infračerveného záření. Funkce sušícího prostředí se zde omezuje pouze na přijímání a odvádění vzniklých par. Intenzita přívodu tepla sušeného materiálu je zde značně vyšší než při ohřevu konvencí.

Sušárny s vysokofrekvenčním ohřevem

Při vysokofrekvenčním ohřevu vzniká teplo přímo v sušeném materiálu v důsledku dielektrických ztrát. Takovýto vznik tepla způsobí, že tepelný tok v materiálu je opačný ve srovnání s dříve uvedenými způsoby ohřevu. To znamená, že tepelný i vlhkostní gradient mají stejný smysl.

Nevýhodou tohoto způsobu sušení je vyšší energetická náročnost, způsobená poměrně nízkou účinností vysokofrekvenčních zdrojů. [5] [6] [7] [8]

1.5 Technický popis výroby hliníkového odlitku

Dříve než se dostaneme k výrobě sádrového jádra (celokruhu), chci Vás nejdříve seznámit s technickým popisem výrobních etap, které jsou nedílnou součástí samotného řešeného problému.

Výroba modelu

Samotné sádrové jádro je přesnou kopií (pozitivem) tzv. modelu. Z obecného hlediska se modely dělí podle dezénu na letní a zimní, s čímž souvisí i další výroba sádrových jader a hliníkových odlitků. Letní dezény jsou méně náročnější na výrobu a opracování, než zimní typy dezénů.

Modely se vyrábí z materiálu Necuron (umělého dřeva). Předem dělená deska na jednotlivé segmenty v počtu 7, 8, 9, nebo 11 dílů se podle programu a technické dokumentace opracovává na CNC 5.osé frézce. Zde se frézuje požadovaný dezén, jehož přesnou kopií je sádrové jádro. Po zhotovení prvního testovacího kusu, jeho zkontrolování dezénové části a odstranění výrobních nedostatků na kontrole modelů, se dofrézuje zbylý počet kusů. Po této operaci sada modelů odchází na ruční dokončení. Zde modeláři opticky kontrolují dezénovou (pohledovou) stranu modelu, odstraní nedostatky, stopy po nástrojích a vkládají modelové lamely. Modelová lamela je vyrobena z plechu a výrobcem tvarovaná dle technické dokumentace na požadovaný tvar dezénových drážek. Po vložení a pojištění lamel lepidlem, odchází testovací model na další výrobní operaci, zhotovení kontrolního otisku. Model je používán s x-násobnou četností. Testovací model je pouze jeden vybraný kus.



Obrázek 3 Model s umělého dřeva s vyfrézovaným dezénem

Kontrolní otisk

Kontrolní otisk (pozitiv) se zhotoví ze silikonového kaučuku v barvě pneumatiky, do zkopírovaných lamelových drážek se vloží výrobní lamely a otisk odchází ke schválení zákazníkovi. Po schválení od zákazníka (výrobce pneumatiky) se celá sada modelů daného dezénu přesune na další operaci, kterou je výroba flexibelu.

Výroba flexibelu

Flexibel (negativ modelu) je vyroben z polykondenzačního silikonového kaučuku s vysokou tvarovou a rozměrovou přesností a pamětí. Sada modelů je ustavena do speciálních přípravků tzv. zad. Po zaformování a vystředění je do přípravku s modelem následně nalitý flexibel. Po zatuhnutí flexibelu, odformování, vyjmutí modelů přichází na řadu další operace, vkládání lamel.

Flexibel může být použit buď 1 krát (pro první formu), nebo vícekrát (pro sériové formy, maximálně 6 krát). Vícenásobným použitím a časem (asi 30 dnů) dochází ke ztrátě tvarových paměťových schopností.

Vkládání lamel

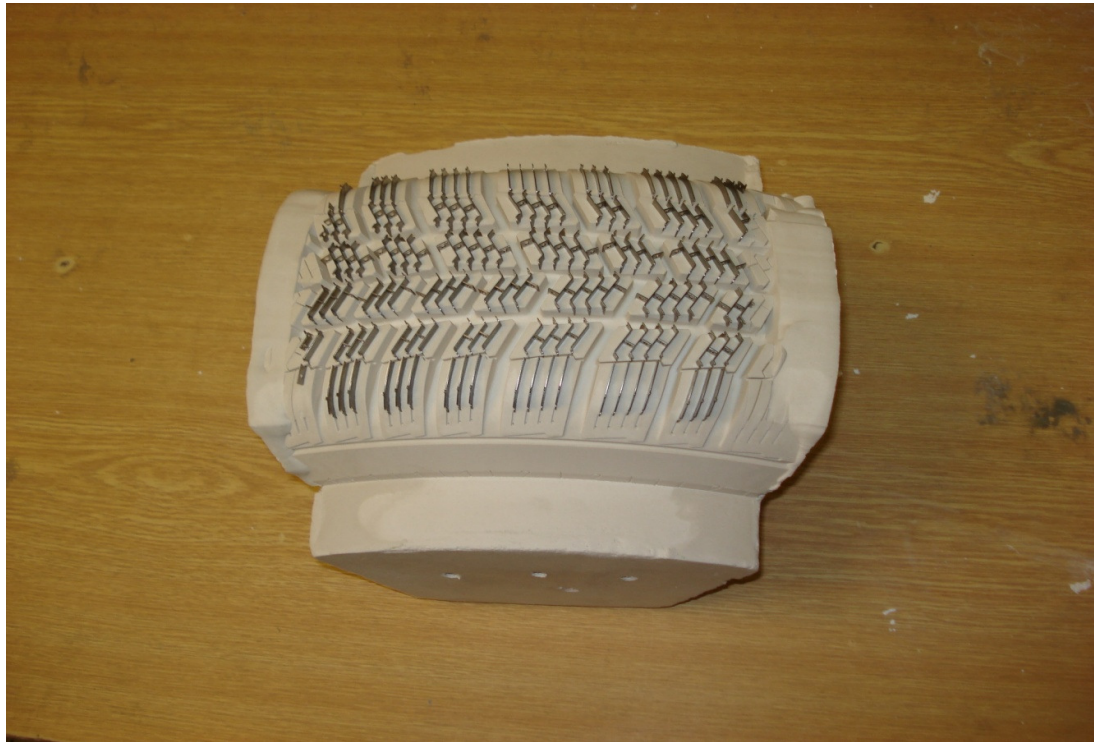
Na pracovišti vkládání lamel, jsou do zad s již zatuhlým flexibelem vloženy výrobní lamely a celá sada putuje na operaci výroba sádrového jádra.



Obrázek 4 Flexibelová kopie modelu s částečně vloženými lamelami

Výroba sádrového jádra litím

Po ustavení a utěsnění flexibelu do licího přípravku se mísí sádra s vodou. Následně část této kašovité konzistence se nanese nástřikem do připraveného přípravku. Zbytek dávky se promísí do požadovaného napěnění a dolije do dutiny jaderníku. Po asi 5 minutách se loží dílenský přípravek a sádra se nechá vytvrdit. Po vytvrzení se přípravek odformuje a vyjme se sádrové jádro. To se dále ustaví a kontroluje na měřícím přípravku pomocí laserového snímače. Po kontrole sádrového jádra (pozitivu) se začišťuje dezénová (pohledová) část od vzniklých sádrových přetoků. Následně se vytvrzená jednotlivá sádrová jádra zařezávají dle výkresové dokumentace na zadanou kruhovou výseč a ustavují na licí desku za pomoci speciálních dílenských přípravků a měrek do celokruhu (pozitiv a přesná kopie celé dezénové části pneumatiky). Po ustavení a zaaretování celokruhu speciálními hřeby se podle potřeby vzniklé mezery mezi jádry zatmelí. Následně je licí deska se sádrovým celokruhem vložena do sušárny, kde se vysuší na požadované parametry dle zadaného technologického postupu. Po vysušení je licí deska se sádrovým celokruhem vyjmuta se sušárny a připravena na další použití.



Obrázek 5 Sádrové jádro (jádrinec)

Požadavky na kvalitu jádra:

- objemová stabilita
- dostatečná manipulační doba
- přesná reprodukce detailů
- žádné dodatečné změny po ztuhnutí
- hladký neporézní povrch
- pevnost v tlaku a ohybu
- dostatečná tvrdost



Obrázek 6 Složený celokruh na licí desce

Výroba hliníkového odlitku

Samotná metalurgická část výroby finálního hliníkového odlitku je velmi náročná, neboť na odlitek jsou kladeny velké výrobní požadavky jako např. deformace a smrštění v daných mezích, co nejlepší kvalita povrchové dezénové části, minimální poréznost pohledových částí, neutváření nežádoucích nálitků, propadlin, vyvřelin atd.

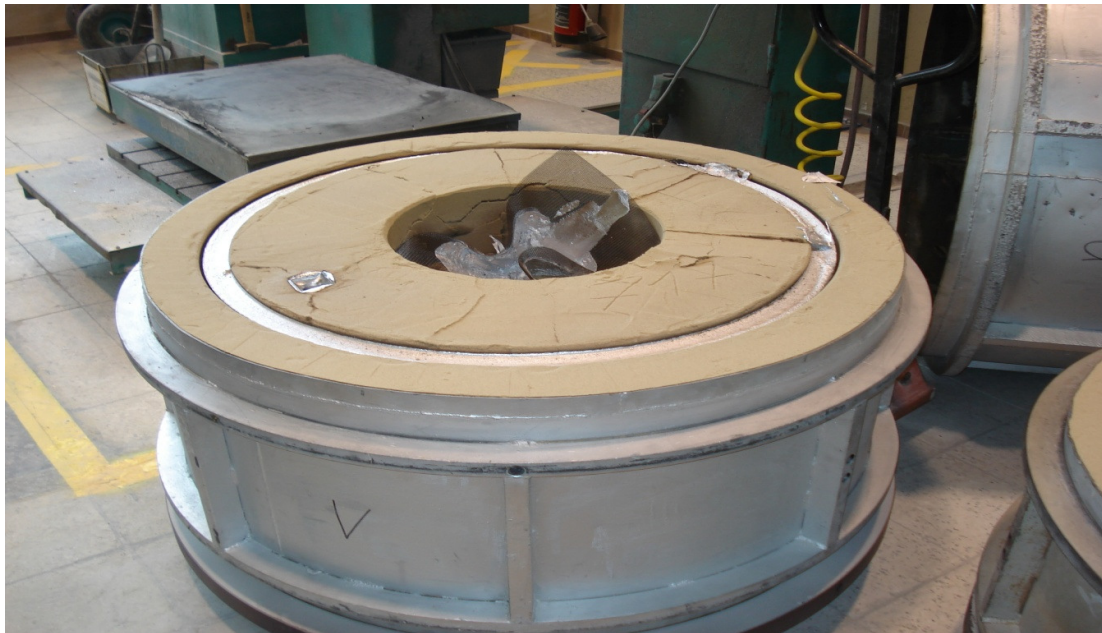
Dříve než se započne se samotným procesem lití, musí se vyrobit písková forma. Na formovací stůl se umístí dřevěný model, který po zhotovení pískové skořepky formy vytvoří dutinu pro vysušený celokruh. Na formovacím stole se dřevěný model ustaví a vystředí, následně se osadí vtokovou soustavou a nálitky. Na takto upravený model se usadí ocelový kruh, který tvoří zadní část pískové formy. Za pomoci směšovacího zařízení se do mezikruží rámu a modelu sype smíšený písek s tužidly a tvrdidly. Písek se pro větší pevnost a odolnost pískové skořepky upěchuje a nechá vytvrdit. Po vyzrání skořepky se písková forma odformuje od dřevěného jádra a vtokové soustavy a vzniklá dutina formy se zbaví případných přetoků a nečistot. Dutina se nastříká pro větší pevnost a hladší povrch vodním sklem. Do zářezů vtokové soustavy se lepí keramické filtry, dolní část formy se utěsní těsnící šňůrou a forma je připravena na odlévání. Dle technologického postupu musí být forma připravena vždy jeden den před odléváním.



Obrázek 7 Písková forma

Pro zlepšení vlastností se sádrový celokruh s pískovou formou (zadním dílem) v sušárně předehejí dle TP. Odsud jsou obě části transportovány k licímu zařízení (tavící peci). Zde se na licí desku s celokruhem usadí a vycentruje písková skořepa, která se zatíží proti případným netěsnostem mezi skořepou a licí deskou. Do takto připravené formy metalurg lije roztavený hliník. Tímto slévárenským procesem se již dále nebudeme zabývat.

Po vychladnutí skořepy se sádrovým a hliníkovým celokruhem se forma odformuje. Po odstranění vnější pískové části, vtokové soustavy a sádrových jader zůstává pouze hliníková forma, což je negativ dezénové části pneumatiky. Tento negativní celokruh se napustí vodou, pro lepší a jednodušší odstranění zbylé části sádrového jádra, očistí pomocí tlakové vody od nečistot, odřezou se nálitky a je dále transportován k dalšímu strojnímu a mechanickému opracování do finální podoby.



Obrázek 8 Hliníkový odlitek v pískové formě

Jak bylo již psáno, finálním produktem je hliníkový celokruh, to znamená, že sádrové jádra jsou pouze jednorázovým produktem k přenosu tvaru dezénu z modelu do odlitku. Na každý odlitek je zapotřebí nové sady sádrových jader.



Obrázek 9 Odlitý celokruh (surový stav)

I když byl získán hliníkový celokruh za přísných technologických podmínek, stále není patrné, jaké množství viditelných a skrytých vad se na segmentech nachází. Toto se dá určit až na přejímce odlitků. Teprve zde se ukáže, zda sušení sádrových jader proběhlo v souladu s technickými předpisy a kvalita vysušení jadřinců je dostačující. Pokud ano, na povrchu dezénové části je minimum vad, pokud ne, a při lití hliníku došlo k nežádoucí reakci mezi roztaveným hliníkem a sádrovým celokruhem je množství vad velké. Jak bylo již v úvodu zmíněno, mezi nejzávažnější viditelné vady patří porozita, vysoké a nízké výronky na žebrech, mapy, řediny, zavaleniny, chybějící nebo přebývající materiál kolem lamel, zborcený povrch dekoru, hrubý povrch běžné plochy.



Obrázek 10 Řediny vzniklé nežádoucí chemickou reakcí

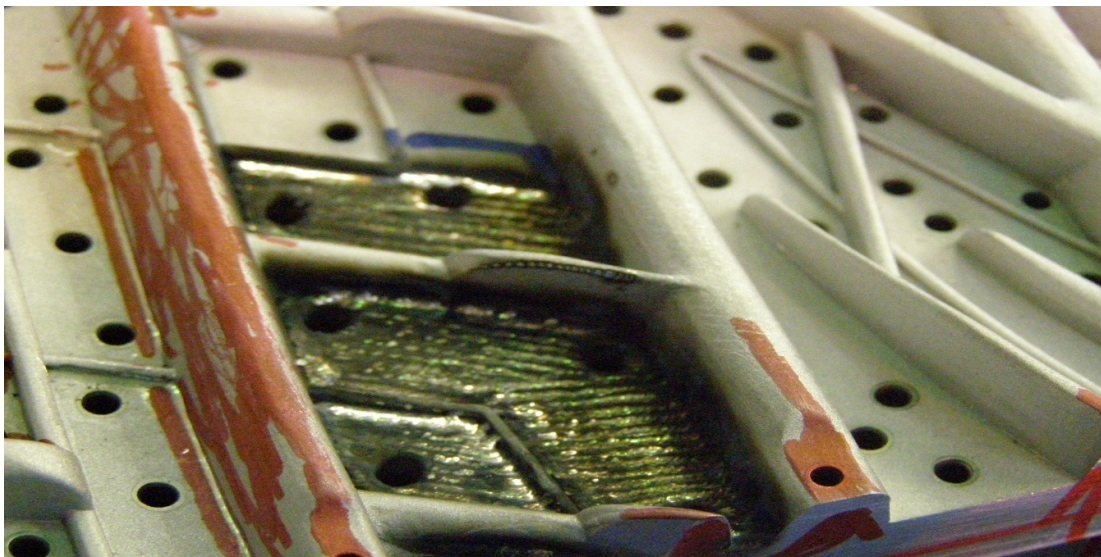


Obrázek 11 Chybějící materiál bočního pásku

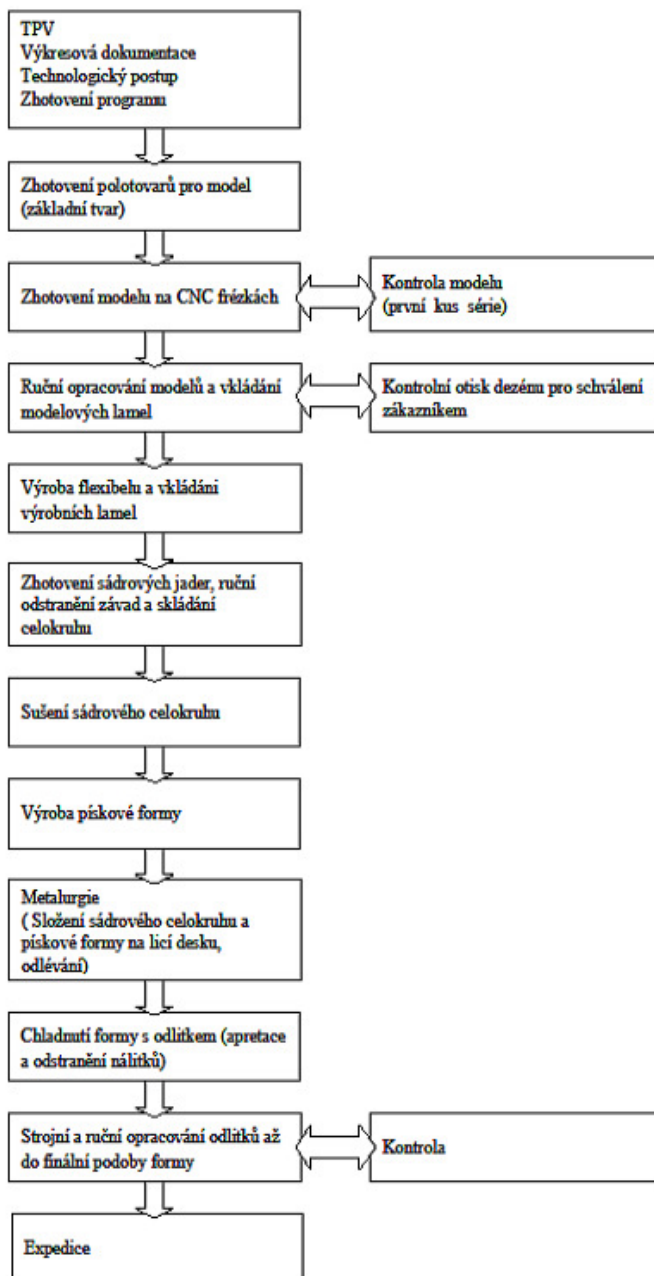


Obrázek 12 Vysoké výronky na žebrech

Na druhou stranu mezi skryté vady patří propadliny, výdutě a skrytá porozita, které se zde neodhalí. Toto je možno odhalit v první fázi na ručním proměření házivosti ale pouze v technologicky předepsaných měřících stopách. Ve druhé fázi je po celkovém opracování dezénu na výrobní kontrole forma kompletně proměřena. Jsou vyznačeny všechny vady včetně skrytých, které jsou následně odstraněny.



Obrázek 13 Vyvařené propadliny



Obrázek 14 Schéma technologického popisu výroby hliníkového odlitku

1.6 Matematický model sušícího děje

Pod tímto pojmem jsou uváděny takové matematické modely, u kterých se předpokládá, že transport složky zevnitř pevné fáze, v našem případě vody, se dá popsat difuzní rovnicí, jejíž řešením je koncentrační pole uvnitř pevné fáze, tvaru rovinné desky sušeného materiálu a časová závislost difundující složky, vody, v okolním prostředí. Model je následující:

$$D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial c}{\partial t} (x, t) \Rightarrow t \geq 0, 0 \leq x \leq b \quad (1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} (0, t) = 0 \quad (2)$$

$$c(b, t) = \varepsilon c_0(t) \quad (3)$$

$$-DS \frac{\partial c}{\partial x} (b, t) = V_0 \frac{\partial c_0}{\partial t} (t) \quad (4)$$

$$c(x, 0) = c_p \quad (5)$$

$$c_0(0) = c_{op} \quad (6)$$

Kde: c_0 je koncentrace složky v okolí

c je koncentrace složky v tuhé fázi

x souřadnice

t čas

D efektivní difuzní koeficient difundující složky v tuhé fázi

d poloviční tloušťka sušeného materiálu

ε porozita tuhé fáze

V_0 objem okolního vzduchu

Rovnice (1) popisuje jednorozměrné vlhkostní pole, jedná e o 2 Fickův zákon, v materiálu (za předpokladu, že vliv okrajů na difuzi uvnitř pevné fáze je zanedbatelný), rovnice (2) značí, že vlhkostní pole v materiálu je symetrické. V rovnici (3) je uveden předpoklad dokonalého **míšení složek** (okrajová podmínka prvního druhu), rovnice (4) je bilanční vztah, podle kterého je rychlost sdílení vlhkosti na povrchu materiálu rovna akumulaci této složky v prostředí. Rovnice (5) udává, že na začátku procesu je konstantní rozdělení vlhkosti v tuhé fázi a vztah (6) udává, že vlhkost okolí je rovna c_{op} .

Pro obecnější vyjádření a zjednodušení budou zavedeny bezrozměrné veličiny

$$C = \frac{c}{c_p}; C_0 = \frac{c_0}{c_p}; Fo = \frac{Dt}{b^2}; X = \frac{x}{b}; Na = \frac{V_c}{V} \quad (7)$$

C bezrozměrná koncentrace vody v zrně zelené kávy

C_0 bezrozměrná koncentrace vlhkosti v okolí

Fo Fourierovo kritérium

X bezrozměrná vzdálenost od středu jadřinců

Na bezrozměrná spotřeba vzduchu

Kde $V = Sb$ je objem tuhé fáze

Aplikací bezrozměrných proměnných C , C_0 , Fo , X , Na rovnice (1-6) získáme matematický model daného procesu v bezrozměrném stavu. **Kolomazník**

Řešení bylo provedeno Laplaceovu transformaci, čímž získáme bezrozměrné koncentrační pole v tuhé fázi (8)

$$C(X, Fo) = \frac{\varepsilon}{Na + \varepsilon} - 2Na \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(X \cdot q_n) e^{-Fo q_n^2}}{\cos(q_n) [Na + \varepsilon] - q_n Na \sin(q_n)} \quad (8)$$

Časový průběh koncentrace vlhkosti v daném prostředí vyjadřuje rovnice (9)

$$C_0(Fo) = \frac{1}{Na + \varepsilon} - \frac{2Na}{\varepsilon} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-Fo q_n^2}}{\varepsilon + Na + \frac{Na^2 q_n^2}{\varepsilon}} \quad (9)$$

Analogickým řešením lze obdržet následující vztahy pro koncentrační pole v sušeném materiálu tvaru válce a koule. [3] [20]

Pro válec

$$C = 2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-F_0 v \alpha_n^2} J_0(R_v \alpha_n)}{\alpha_n J_1(\alpha_n)} \quad (10)$$

Pro kouli

$$C = -\frac{2}{\pi R_k} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin(n \pi R_k) e^{-F_0 k n^2 \pi^2} \quad (11)$$

Kde: J_0 Besselova funkce 0. řádu

J_1 Besselova funkce 1. řádu

R_k Bezrozměrná vzdálenost - koule

R_v Bezrozměrná vzdálenost - válec

α_n n-tý kořen Besselovy funkce

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ

2.1 Experimentální popis sušícího procesu sušení sádrových jader

Použité měřicí přístroje:

Teploměr a vlhkoměr TESTO 600

Nástěnný teploměr a vlhkoměr COMET

Vlhkoměr TESTO 601-3

Digitální váha SOEHNLE

Popis postupu

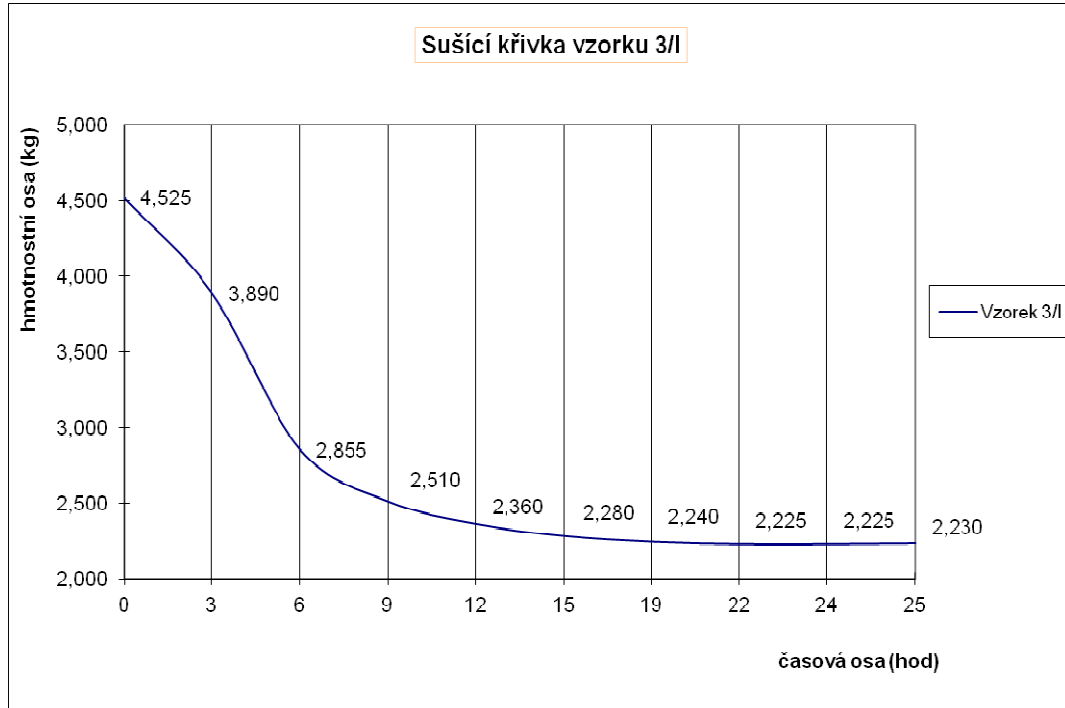
Po konzultaci s ing. Hazuchou, mým konzultantem a technologem slévárny VFB a doc. Jánáčovou, mou vedoucí bakalářské práce, byl navržen postup sušení shodný s technologickým postupem platným pro sušení sádrových jader v Divizi VFB.

Pro výrobu sádrových jader byla použita prášková sádra značky Thermold (viz „Identifikační list“ str. 24), která byla smíchána s vodou o teplotě 26 °C a poměru 1:1. Zhotovení sádrových odlitků provedli poučení pracovníci 4-5 hodin před sušením. Za tuto dobu se při výrobě ostrých forem sádrové odlitky opracují, odstraní se nedostatky výroby a vizuálně zkontrolují (viz popis „Výroba sádrového jádra litím“ – teoretická část str.31). Protože je odlévání sádrových jader ruční práce, nikdy nejsou jádra váhově stejné. Stejný je jenom tvar a rozměr. Pro výrobu sádrových vzorků se použilo flexibelu zimního dezénu 155/65 R13 POLARIS. Po vyjmutí zatuhnutých jader se vybrané vzorky označily pro identifikaci (tabulky 5 – 8 „Číslo jádra“). Následně bylo provedeno první snímkování požadovaných parametrů, tj. hmotnost (obrázek 31) sádrových vzorků, vnitřní vlhkost a teplota (obrázek 32). Tyto tři parametry byly pro experimentální praktické měření stěžejní. Po snímkování byla vsázka umístěna do sušící pece, byly nastaveny parametry sušení a zpuštěn sušící cyklus (obrázek 33). Veškeré snímkové hodnoty a parametry byly zapisovány do tabulek včetně nitřní a vnější teploty a vlhkosti (tabulky 5 – 8). *Vnější teplotou* či *vlhkostí* se rozumí teplota nebo vlhkost mimo budovu, tj. *venkovní*. Na druhé straně *vnitřní* je uvnitř výrobní haly nikoli však uvnitř sušícího zařízení. Pro časovou náročnost sušícího procesu, který trvá 25 hodin, byly dohodnuty časy jednotlivých dílčích měřících

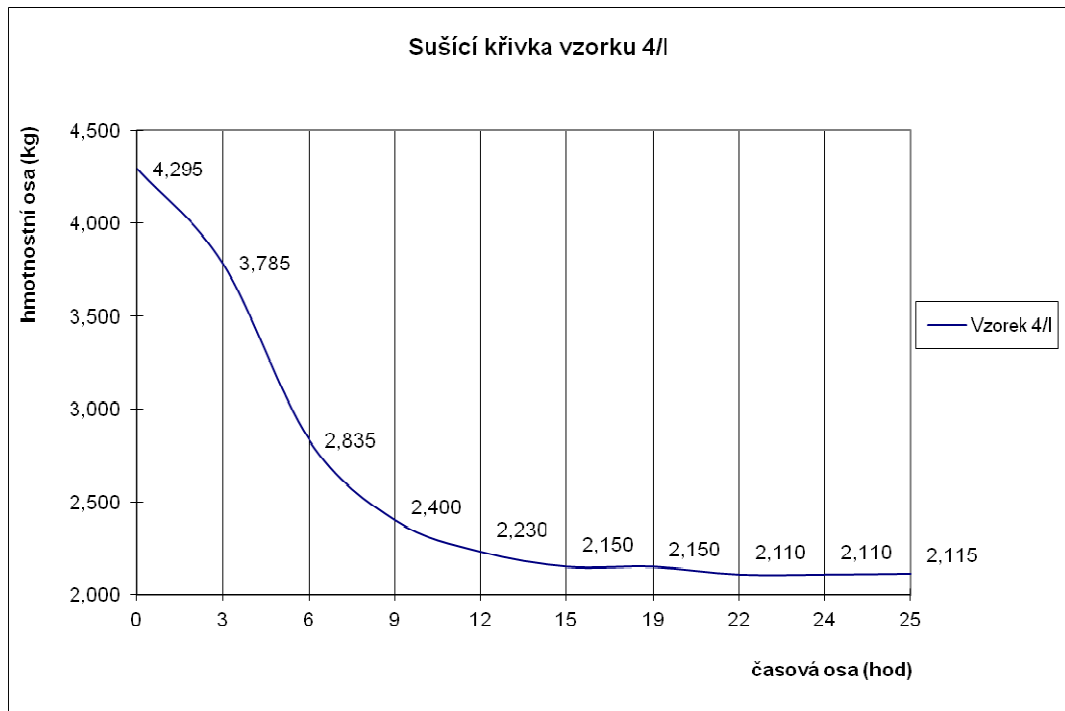
intervalů uvedených na obrázcích 19, 24, 29a34. Pro korektnost měření byly jednotlivé měřicí cykly shodné, jenom časově posunuté. Toto bylo způsobeno výrobním využitím sušáren. Jednotlivé dílčí měření trvalo cca do 10 minut a obsahovalo: vyjmutí vzorků z pece, zvážení, měření vnitřní teploty a vlhkosti, zapsání naměřených hodnot do tabulek a opětovné uložení vsázky do pece. Při měření byla ovlivněna teplota sušárny pouze otevřením a zavřením dveří při manipulaci se vzorky. Pokles teploty v peci činil 5 – 7 °C což je pro toto měření zanedbatelné, neboť požadovaná sušicí teplota uvnitř pece je 250 °C při téměř nulové vlhkosti. Po ukončení celého sušicího cyklu byly jednotlivé naměřené údaje zkontrolovány, vyhodnoceny a graficky zpracovány. Všechny data jsou zaznamenána na obrázcích 20 – 23, 25 – 28, 30 – 33, 35 – 38.

Číslo jádra	Hmotnost jádra (kg)	Vlhkost jádra (%)	Vypočítaná vlhkost %	Teplota jádra (°C)	Čas sušení (hod)	Čas sušení (hod)	Čas dílčího měřicího intervalu	Poč. teplota pece (°C)	Teplota prostředí vnitřní (°C)	Teplota prostředí vnější (°C)	Vlhkost prostředí vnitřní (%)	Vlhkost prostředí vnější (%)
3/I	4,525	96,1	56,53	21,7	5:00	8:00	0	37	21,3	11	19,3	65
4/I	4,295	95,2	56,51	21,6								
6/I	4,510	95,7	56,50	21,4								
7/I	4,955	94,8	56,51	21,4								
3/I	3,890	99,9	49,43	37,9	8:10	11:00	3	123,4	28,2	16	28,8	57
4/I	3,785	99,9	50,65	38,6								
6/I	4,035	99,9	51,38	36,2								
7/I	4,230	99,9	49,05	36,4								
3/I	2,855	99,9	31,10	58,1	11:10	14:00	6	222,6	29,7	24	26,6	40
4/I	2,835	99,9	34,11	61,1								
6/I	3,050	99,9	35,67	55,8								
7/I	3,165	99,9	31,91	60,7								
3/I	2,510	26	21,63	75,8	14:10	17:00	9	242,6	33,9	28,9	18,2	20
4/I	2,400	19,4	22,17	77								
6/I	2,535	29,4	22,60	77,5								
7/I	2,735	17	21,21	77,8								
3/I	2,360	9	16,65	96,8	17:10	20:00	12	246,5	34,9	29,2	16,2	20
4/I	2,230	10,8	16,23	87,5								
6/I	2,355	8,6	16,69	93,8								
7/I	2,575	11,4	16,31	92,3								
3/I	2,280	3,7	13,73	115,8	20:10	23:00	15	248	34,1	21,9	13,5	23
4/I	2,150	5,4	13,12	117								
6/I	2,265	3,8	13,38	116,8								
7/I	2,490	7,8	13,45	106								
3/I	2,240	3,1	12,19	140,6	23:10	3:00	19	249,9	32,8	16	15,6	55
4/I	2,150	3,1	13,12	140,9								
6/I	2,240	2,9	12,41	139,6								
7/I	2,455	3	12,22	141								
3/I	2,225	2,6	11,60	144	3:10	5:00	22	248	31,5	12,9	19,7	64
4/I	2,110	2,7	11,47	138								
6/I	2,205	3,6	11,02	146								
7/I	2,425	3,1	11,13	134								
3/I	2,225	2,5	11,60	124,4	5:10	6:00	24	175	30,6	11,7	18,8	58
4/I	2,110	2,4	11,47	125,3								
6/I	2,205	2,4	11,02	123,9								
7/I	2,425	2,6	11,13	113								
3/I	2,230	2,5	11,79	83,6	6:00		25	121	30	11,5	19,3	58
4/I	2,115	2,4	11,68	93,8								
6/I	2,210	2,6	11,22	86,7								
7/I	2,430	3,1	11,32	88,8								

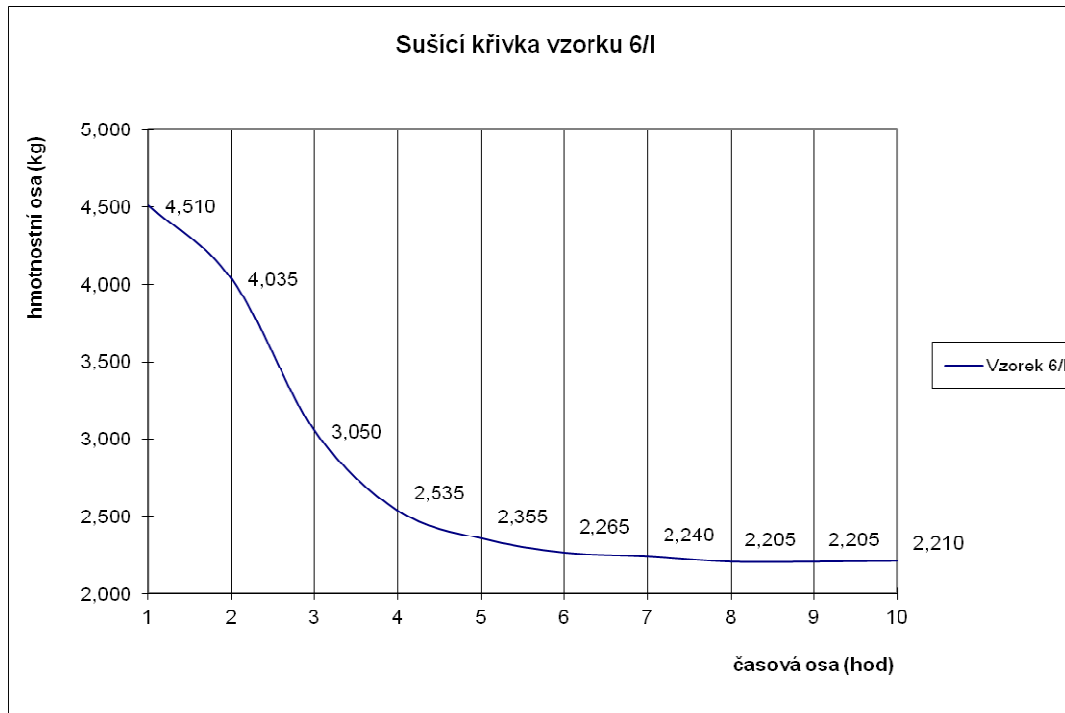
Tabulka 5 Vyhodnocení vzorků 3/I; 4/I; 6/I; 7/I



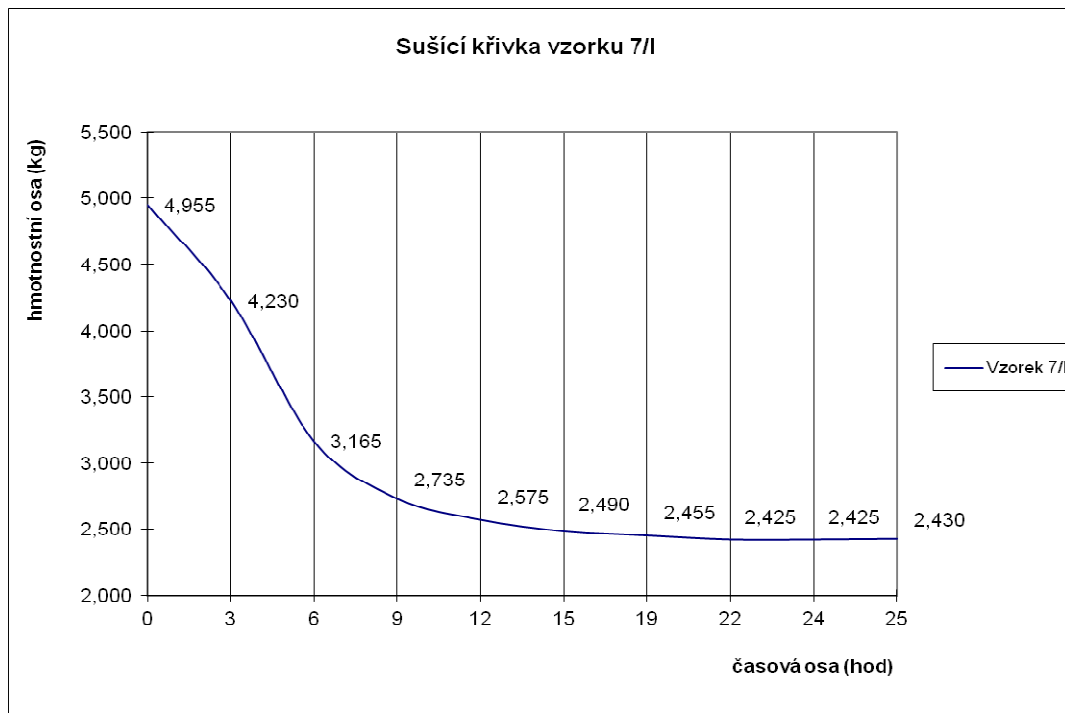
Obrázek 15 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 3/I



Obrázek 16 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 4/I



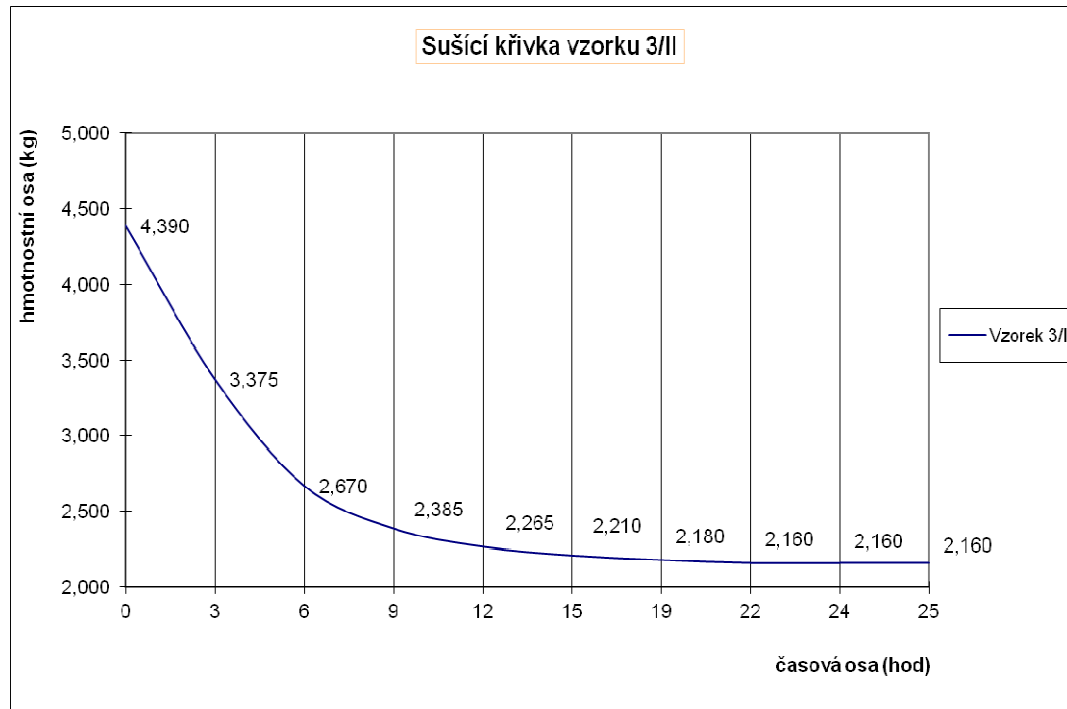
Obrázek 17 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 6/I



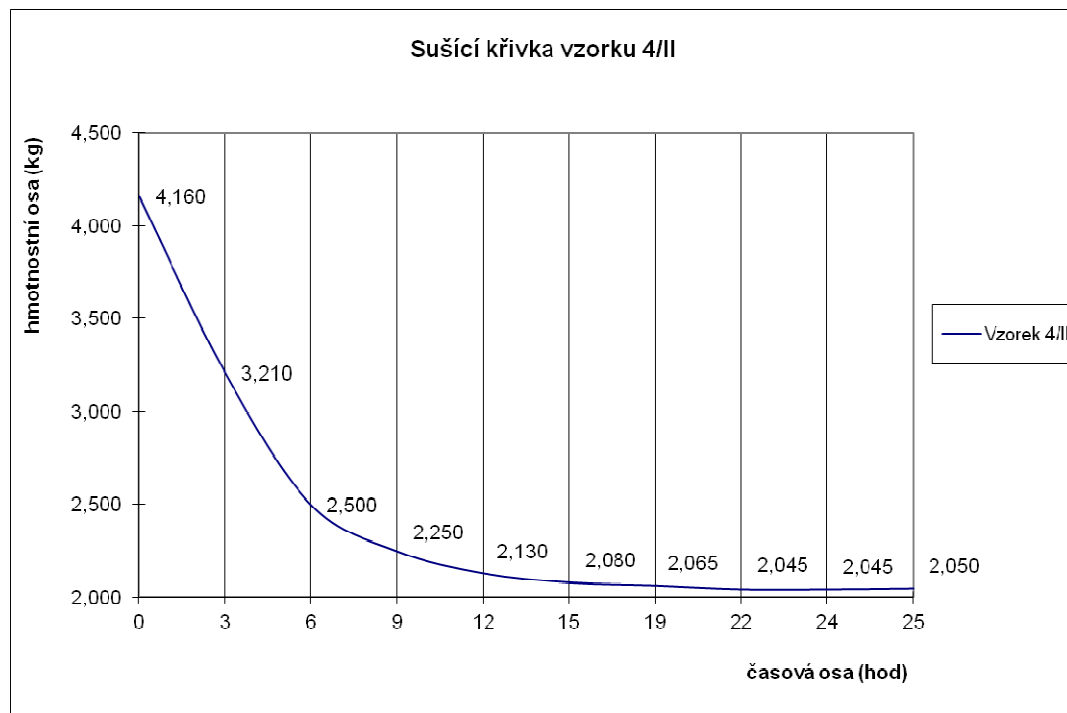
Obrázek 18 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 7/I

Číslo jádra	Hmotnost jádra (kg)	Vlhkost jádra (%)	Vypočítaná vlhkost %	Teplota jádra (°C)	Čas sušení (hod)	Čas sušení (hod)	Čas dílčího měřicího intervalu	Poč. teplota pece (°C)	Teplota prostředí vnitřní (°C)	Teplota prostředí vnější (°C)	Vlhkost prostředí vnitřní (%)	Vlhkost prostředí vnější (%)
3/II	4,390	95,7	56,49	21,5	6:00	9:00	0	52	32,8	12	19,8	64
4/II	4,160	95,3	56,49	21,6								
6/II	4,425	95,7	56,61	21,6								
7/II	4,960	93,9	56,51	21,4								
3/II	3,375	99,9	43,41	45,2	9:10	12:00	3	134	32	19	24,1	52
4/II	3,210	99,9	43,61	43,5								
6/II	3,605	99,9	46,74	37,8								
7/II	4,070	99,9	47,00	43,3								
3/II	2,670	99,9	28,46	65,8	12:10	15:00	6	243	32,3	26	20,2	30
4/II	2,500	99,9	27,60	61,9								
6/II	2,730	99,9	29,67	63								
7/II	3,075	99,9	29,85	64,6								
3/II	2,385	13,4	19,92	90	15:10	18:00	9	250,9	34,6	18	16,8	19,8
4/II	2,250	12,1	19,56	88,4								
6/II	2,420	21	20,66	80,2								
7/II	2,745	9,6	21,42	93,1								
3/II	2,265	6,9	15,67	109	18:10	21:00	12	249	35,1	28,4	15	20
4/II	2,130	9,5	15,02	105								
6/II	2,285	11	15,97	93,9								
7/II	2,585	7,2	16,56	105								
3/II	2,210	3,5	13,57	127,7	21:10	1:00	15	250,1	34,4	21,9	13,1	23
4/II	2,080	3,7	12,98	123,4								
6/II	2,225	5,8	13,71	114,2								
7/II	2,515	4,1	14,23	128,1								
3/II	2,180	3,1	12,39	138,9	1:10	4:00	19	249,8	33,1	16,5	15,6	52
4/II	2,065	3	12,35	130								
6/II	2,180	3	11,93	132,5								
7/II	2,480	3,6	13,02	130,1								
3/II	2,160	2,6	11,57	135,3	4:10	6:00	22	251,9	31,5	12,9	19,6	66
4/II	2,045	2,7	11,49	127								
6/II	2,160	2,6	11,11	136,1								
7/II	2,420	2,5	10,87	136,3								
3/II	2,160	2,4	11,57	116,5	6:10	7:00	24	182	30	12,8	19,2	58
4/II	2,045	2,4	11,49	114,8								
6/II	2,160	2,4	11,11	115								
7/II	2,420	2,5	10,87	103,3								
3/II	2,160	2,8	11,57	76,1	7:00		25	93,9	28	13	25,5	55
4/II	2,050	3,1	11,71	73,9								
6/II	2,160	2,8	11,11	76,2								
7/II	2,425	3,1	11,05	73,7								

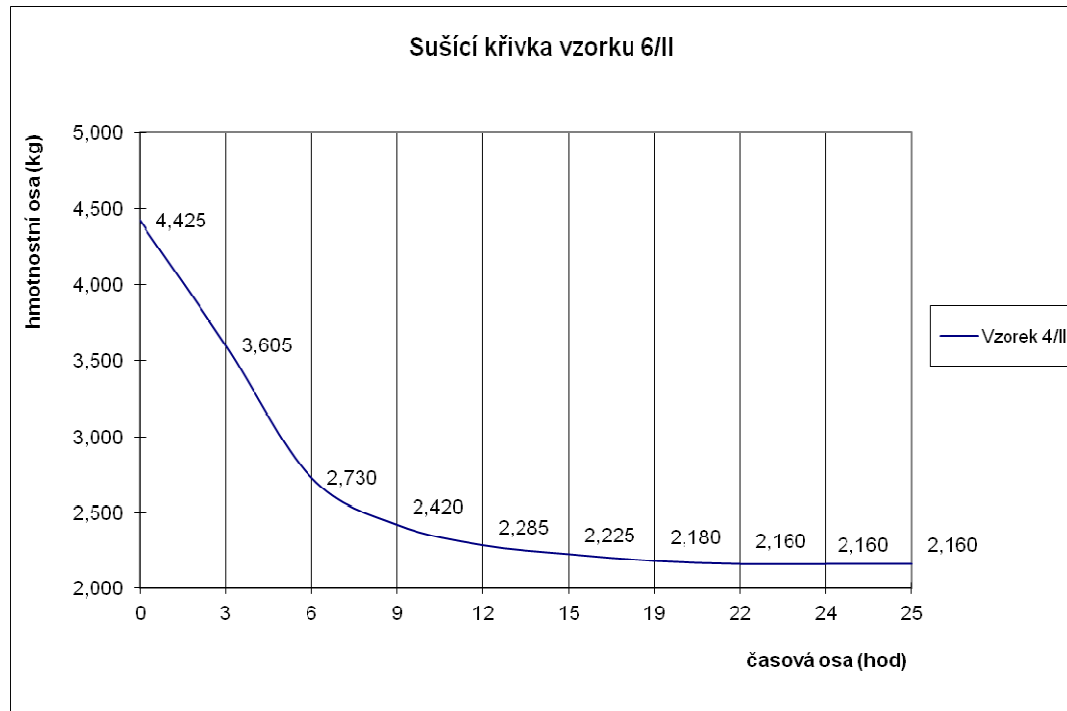
Tabulka6 Vyhodnocení vzorků 3/II; 4/II; 6/II; 7/II



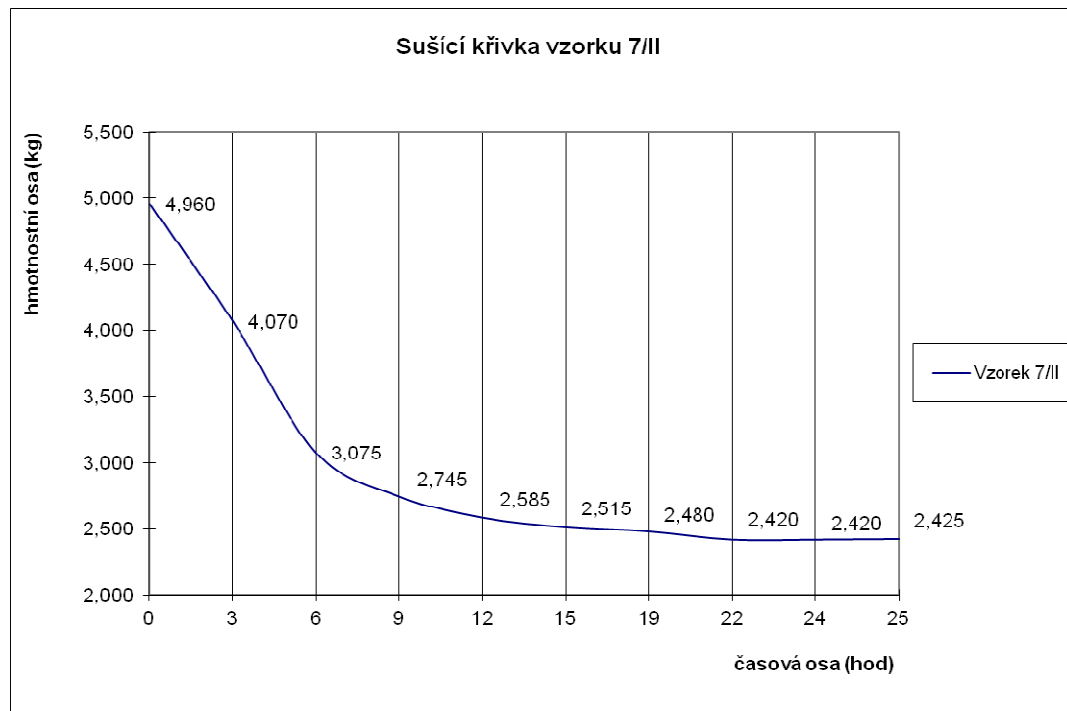
Obrázek 19 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 3/II



Obrázek 20 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 4/II



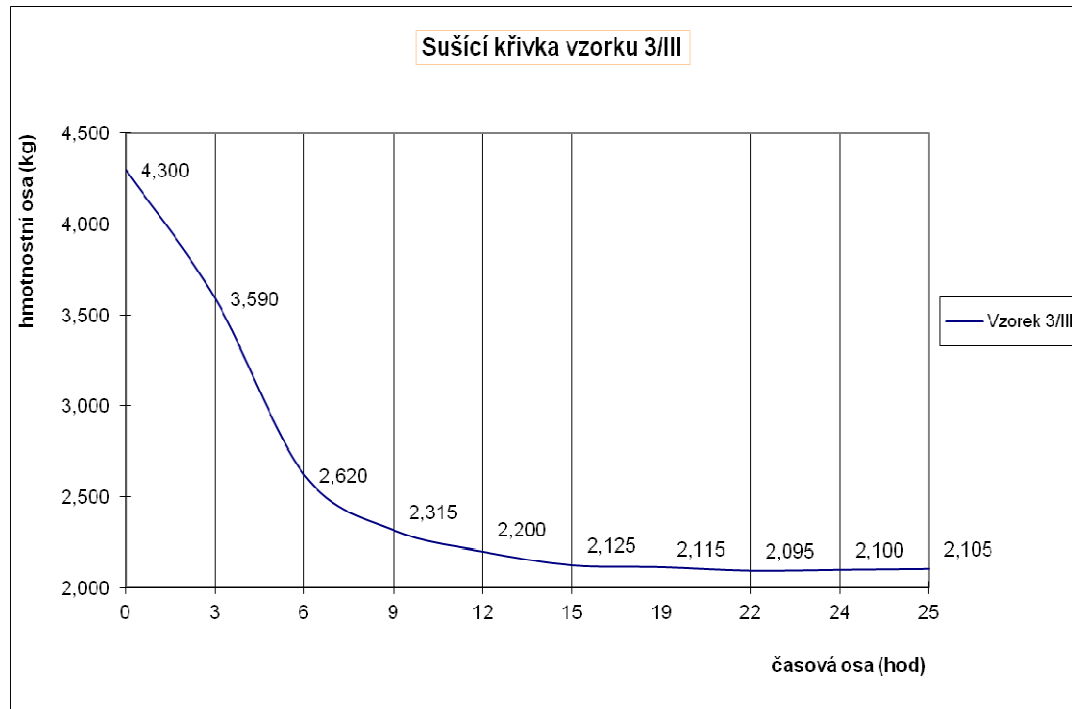
Obrázek 21 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 6/II



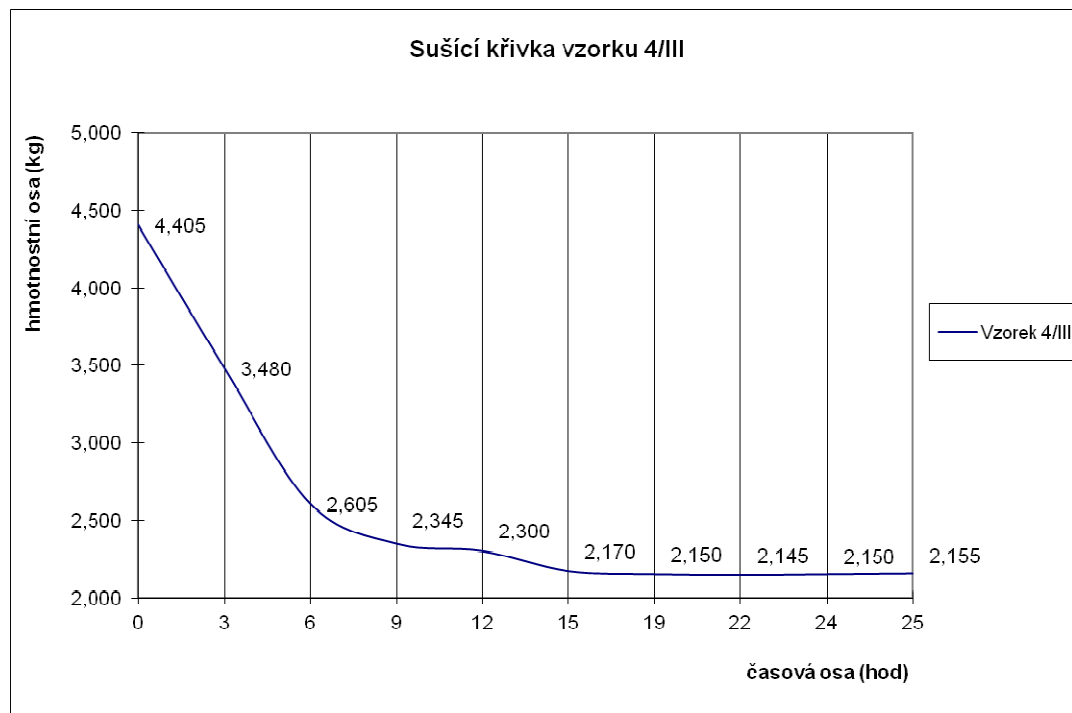
Obrázek 22 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 7/II

Číslo jádra	Hmotnost jádra (kg)	Vlhkost jádra (%)	Vypočítaná vlhkost %	Teplota jádra (°C)	Čas sušení (hod)	Čas sušení (hod)	Čas díčičího měřičího intervalu	Poč. teplota pece (°C)	Teplota prostředí vnitřní (°C)	Teplota prostředí vnější (°C)	Vlhkost prostředí vnitřní (%)	Vlhkost prostředí vnější (%)
3/III	4,300	98,5	56,51	24,8	5:00	8:00	0	36,6	30,2	13,4	32	68
4/III	4,405	98,5	56,50	25								
6/III	4,625	97,6	56,50	25,5								
7/III	4,900	98,8	58,55	25,4								
3/III	3,590	99,9	47,91	41,6	8:10	11:00	3	123,8	27,6	17,9	32,2	63
4/III	3,480	99,9	44,94	42,3								
6/III	3,540	99,9	43,16	41,5								
7/III	4,115	99,9	50,64	40,1								
3/III	2,620	99,9	28,63	64,6	11:10	14:00	6	248,4	32,8	25	27,7	49
4/III	2,605	96,3	26,45	60								
6/III	2,780	87,7	27,63	63								
7/III	3,030	77,5	32,97	68								
3/III	2,315	9,3	19,22	93,3	14:10	17:00	9	250,2	37,9	30	20,2	33
4/III	2,345	8,1	18,29	91,3								
6/III	2,495	8,1	19,36	93,3								
7/III	2,705	7,8	24,92	92								
3/III	2,200	6,2	15,00	99,6	17:10	20:00	12	248,1	37,8	29	17,1	34
4/III	2,300	4,4	16,70	103,7								
6/III	2,365	4,2	14,93	104,1								
7/III	2,555	4,3	20,51	104,2								
3/III	2,125	3,4	12,00	110,2	20:10	23:00	15	249,4	36,5	20	20,1	55
4/III	2,170	2,6	11,71	110,6								
6/III	2,285	2,9	11,95	110,9								
7/III	2,465	3,1	17,61	111,98								
3/III	2,115	2,3	11,58	118,9	23:10	3:00	19	250	36,4	17	22,8	62
4/III	2,150	2,4	10,88	120,8								
6/III	2,270	2,3	11,37	122,6								
7/III	2,445	2,3	16,93	120,9								
3/III	2,095	2,3	10,74	121,1	3:10	5:00	22	250,1	36,1	17	22,5	64
4/III	2,145	2,4	10,68	108,1								
6/III	2,250	2,3	10,58	118,6								
7/III	2,410	2,3	15,73	119,1								
3/III	2,100	2,2	10,95	95,6	5:10	6:00	24	162,8	36	15,5	22	57
4/III	2,150	2,4	10,88	88,4								
6/III	2,250	2,4	10,58	95,8								
7/III	2,410	2,2	15,73	95,4								
3/III	2,105	4,8	11,16	78,6	6:00		25	86,2	15,3	15,6	19,8	54
4/III	2,155	4,4	11,09	77,2								
6/III	2,260	4,9	10,97	78,3								
7/III	2,425	4,8	16,25	78,4								

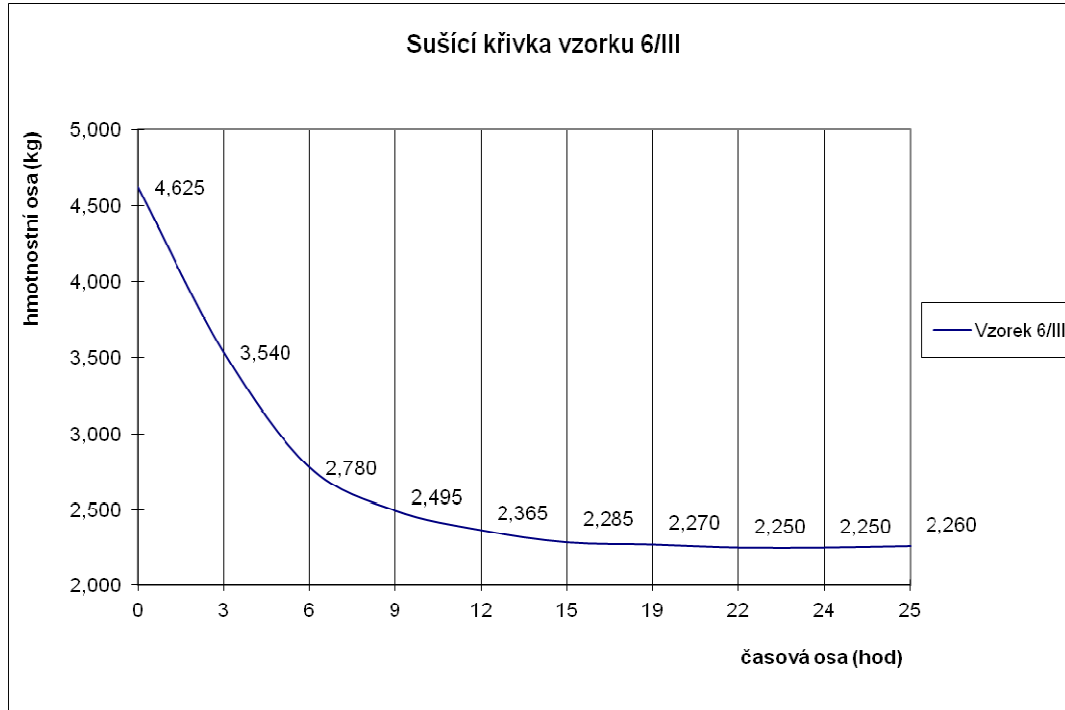
Tabulka7 Vyhodnocení vzorků 3/III; 4/III; 6/III; 7/III



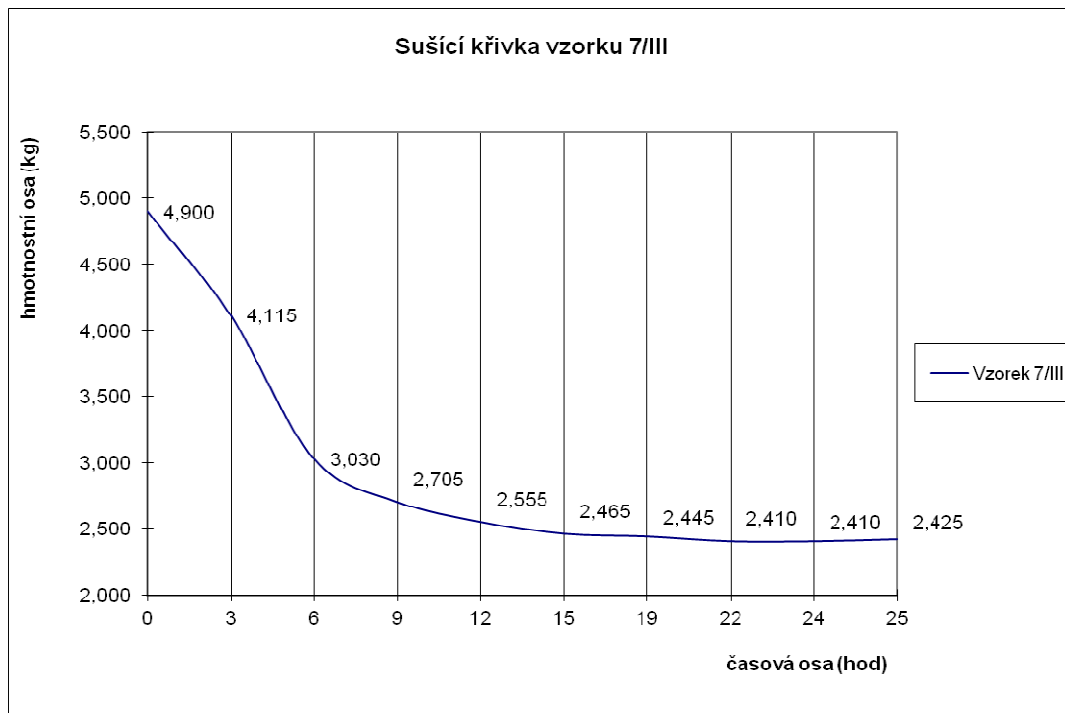
Obrázek 23 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 3/III



Obrázek 24 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 4/III



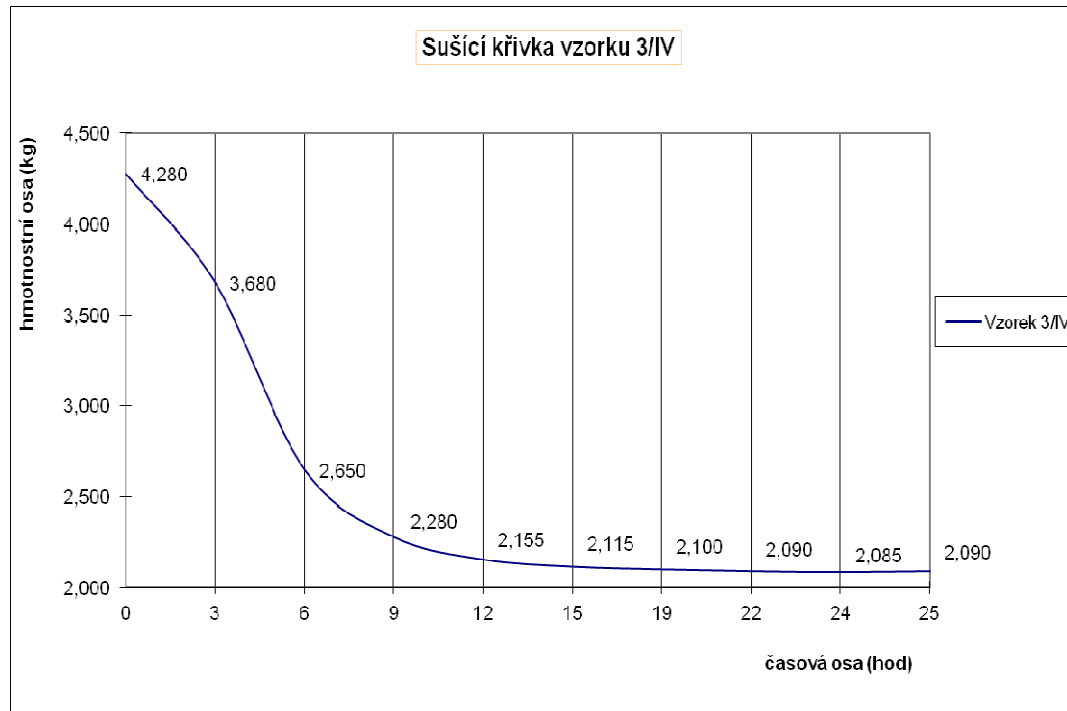
Obrázek 25 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 6/III



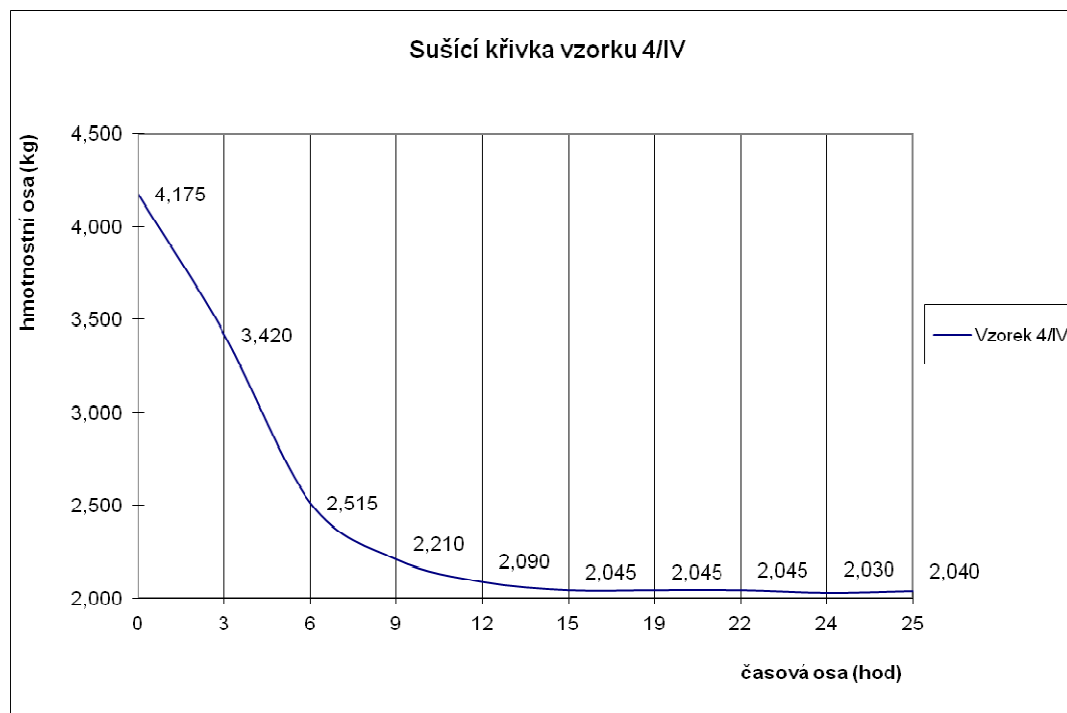
Obrázek 26 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 7/III

Číslo jádra	Hmotnost jádra (kg)	Vlhkost jádra (%)	Vypočítaná vlhkost %	Teplota jádra (°C)	Čas sušení (hod)	Čas sušení (hod)	Čas dílčího měřicího intervalu	Poč. teplota pece (°C)	Teplota prostředí vnitřní (°C)	Teplota prostředí vnější (°C)	Vlhkost prostředí vnitřní (%)	Vlhkost prostředí vnější (%)
3/IV	4,280	97,3	56,50	26,9	5:30	8:30	0	38,3	27,3	14,9	36,3	69
4/IV	4,175	95,5	56,50	27,2								
6/IV	4,415	95,6	56,51	28								
7/IV	4,705	94,7	56,49	26,3								
3/IV	3,680	99,5	49,40	41	8:40	11:30	3	124,2	28,1	19	35,1	61
4/IV	3,420	99,5	46,90	42,2								
6/IV	3,695	99,5	48,04	43,2								
7/IV	4,190	99,5	51,15	40,7								
3/IV	2,650	99,5	29,74	63,6	11:40	14:30	6	248,3	33,8	25,2	27	47
4/IV	2,515	99,5	27,79	62,7								
6/IV	2,670	99,5	28,09	61,3								
7/IV	3,015	99,5	32,11	66,2								
3/IV	2,280	9,5	18,33	85,5	14:40	17:30	9	249,3	37,4	29,4	18,1	32
4/IV	2,210	10,9	17,83	90,2								
6/IV	2,330	7,7	17,60	93								
7/IV	2,560	10,8	20,04	93,1								
3/IV	2,155	4,1	13,60	108,3	17:40	20:30	12	246,8	38	29,1	17,2	24
4/IV	2,090	3,8	13,11	106,6								
6/IV	2,210	3,8	13,12	105,3								
7/IV	2,400	7,9	14,71	98,2								
3/IV	2,115	2,9	11,96	115,9	20:40	23:30	15	248,1	37,6	20,1	19,7	58
4/IV	2,045	2,9	11,20	124,7								
6/IV	2,170	2,7	11,52	124								
7/IV	2,325	2,7	11,96	124								
3/IV	2,100	2,6	11,33	122,9	23:40	3:30	19	249,3	37	17,1	20,6	62
4/IV	2,045	2,5	11,20	121,3								
6/IV	2,165	2,6	11,32	119								
7/IV	2,305	2,1	11,19	124,9								
3/IV	2,090	2,4	10,91	115,9	3:40	5:30	22	251,9	36,3	16,3	22,3	63
4/IV	2,045	2,4	11,20	122,2								
6/IV	2,150	2,2	10,70	123,4								
7/IV	2,290	2,6	10,61	126,2								
3/IV	2,085	2,5	10,70	103,2	5:40	6:30	24	196,3	35	15,6	22,4	57
4/IV	2,030	2,6	10,54	102,1								
6/IV	2,140	2,5	10,28	93,9								
7/IV	2,290	2,3	10,61	105,6								
3/IV	2,090	5,3	10,91	74,3	6:30		25	57	33,4	16,7	24,9	55
4/IV	2,040	5,4	10,98	76								
6/IV	2,150	5,4	10,70	75,6								
7/IV	2,295	5,1	10,81	76,1								

Tabulka 8 Vyhodnocení vzorků 3/IV; 4/IV; 6/IV; 7/IV



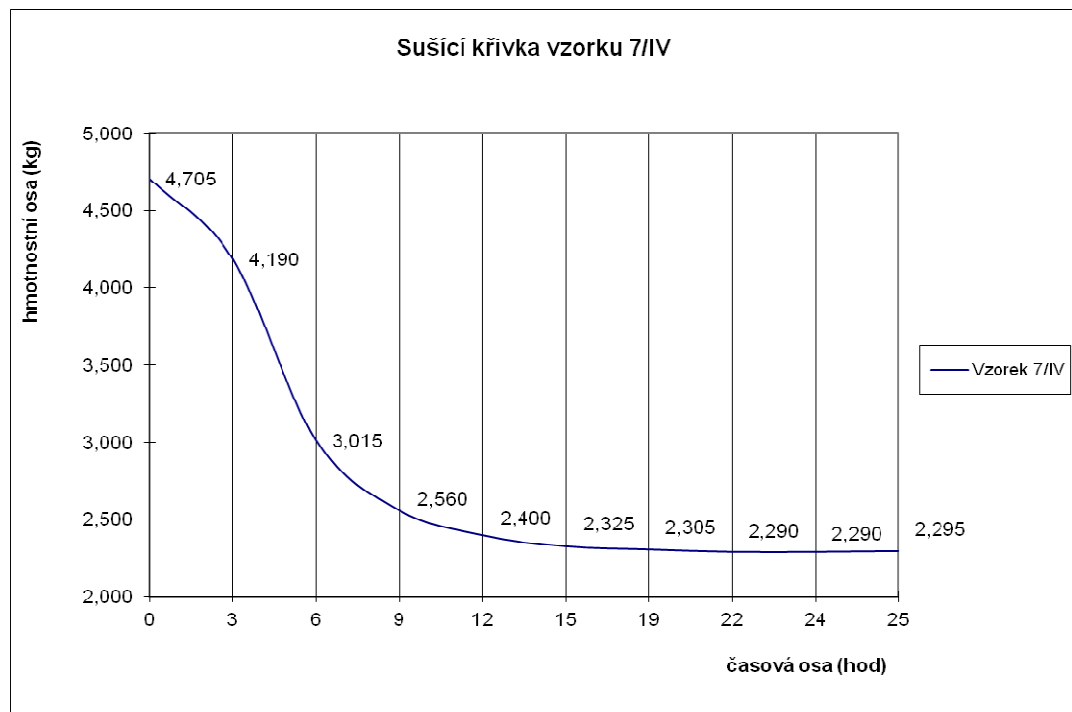
Obrázek 27 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 3/IV



Obrázek 28 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 4/IV



Obrázek 29 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 6/IV



Obrázek 30 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 7/IV



Obrázek 31 Měření hmotnosti sádrového jádra



Obrázek 32 Měření vnitřní vlhkosti a teploty sádrového jádra



Obrázek 33 Umístění vsázky v sušárně

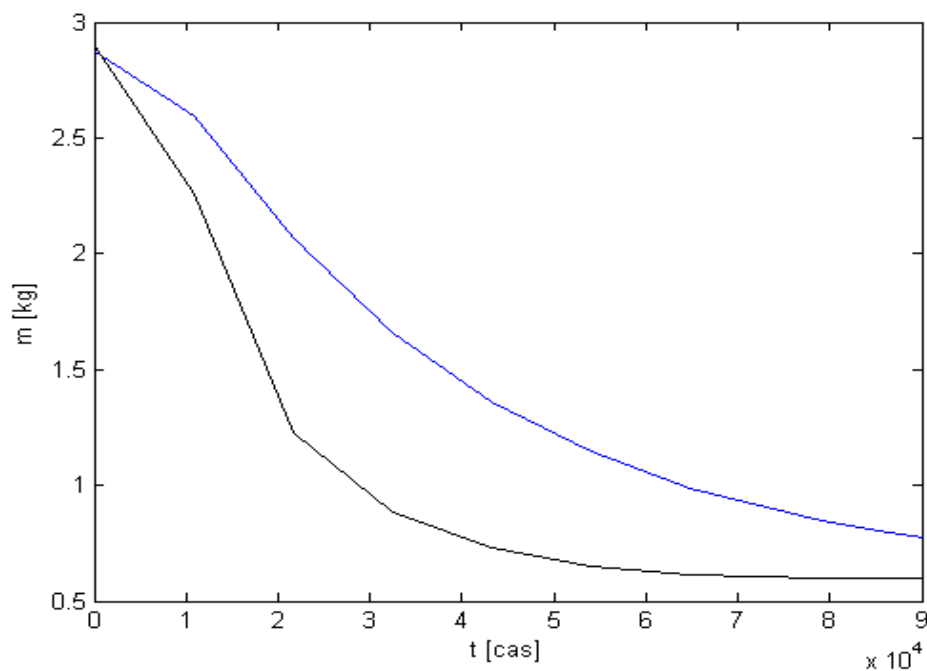
2.2 Porovnání sušících křivek s teoretickými průběhy sušících křivek na základě použitého matematického modelu

Z výsledků experimentálního měření sušících křivek je patrné, že rovnovážné vlhkosti u měřených vzorků se dosáhlo po uplynutí 22 hodin. Průběhy naměřených sušících křivek jsem porovnal s teoretickými průběhy, které byly grafickými výstupy řešení níže uvedených matematických modelací. Pro porovnání byla použita již existující programová aplikace vytvořená v prostředí MATLAB, která je schopna zobrazit vlhkostní pole v materiálu a následně teoretické sušící křivky na základě uvedeného matematického difúzního modelu platného pro desku. Navíc dokáže zobrazovat pro další standardní tvary jako je válec a koule. Pomocí této aplikace lze srovnávat výsledky i při změnách některého ze zadávaných parametrů.

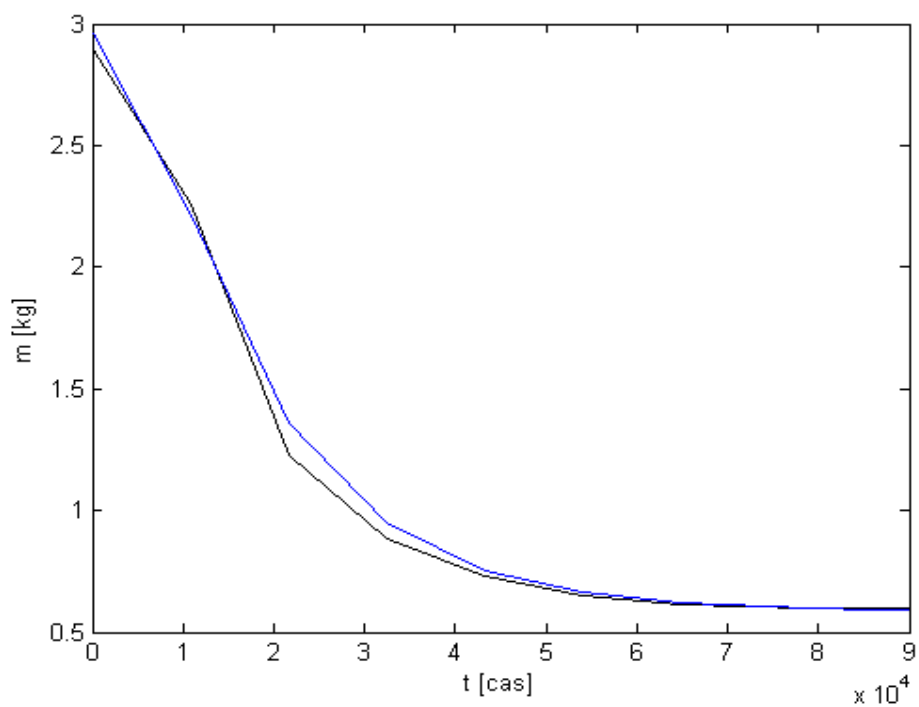
Aplikace byla vytvořena na Ústavu automatizace a řídicí techniky, Fakulty aplikované informatiky UTB ve Zlíně panem Bc. Vojtěchem Grygarem. [20]

Pro zadané vstupní hodnoty se ukázalo, že pro vybraný vzor sádrového jádra 3/I největší shodu vykazuje teoretická sušící křivka platná pro vzorek tvaru válce, jak je ukázáno na obrázcích 35 až 37. Proto i následně další vzorky jsem aproximoval sušící křivkou pro vzorek tvaru válce.

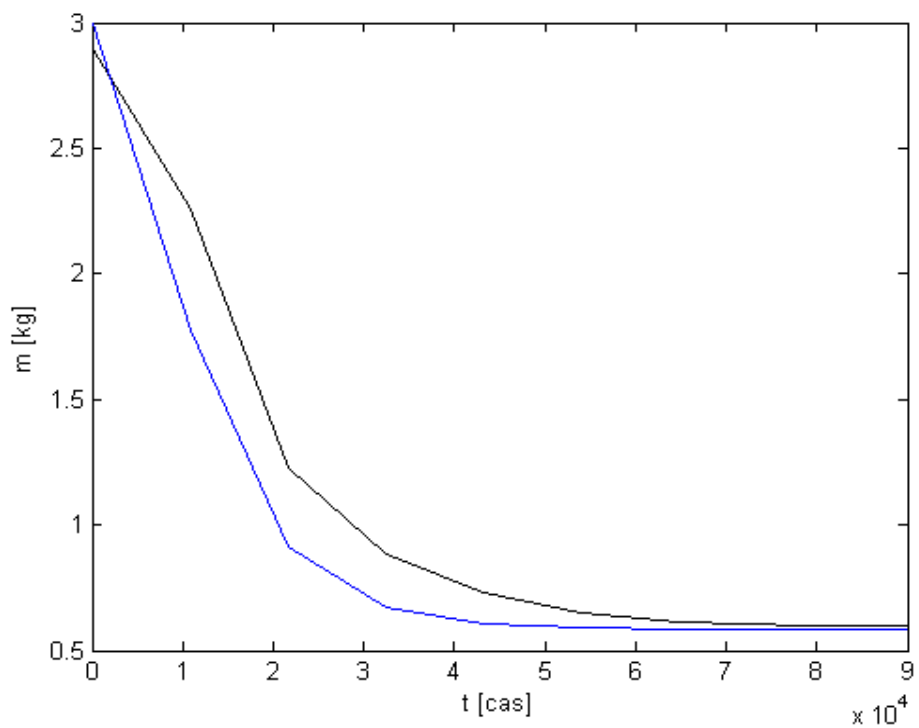
Tabulka 9 Zadané hodnoty pro aplikaci matematického modelu [20]



Obrázek 34 Grafické srovnání sušícího cyklu vzorku 3/I a aplikované desky [20]

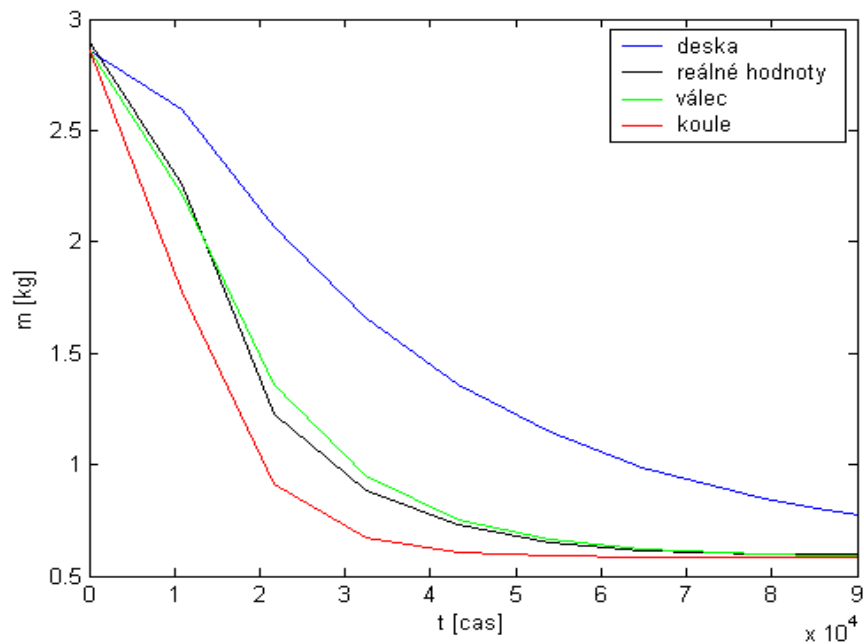


Obrázek 35 Grafické srovnání sušícího cyklu vzorku 3/I a aplikovaného válce [20]

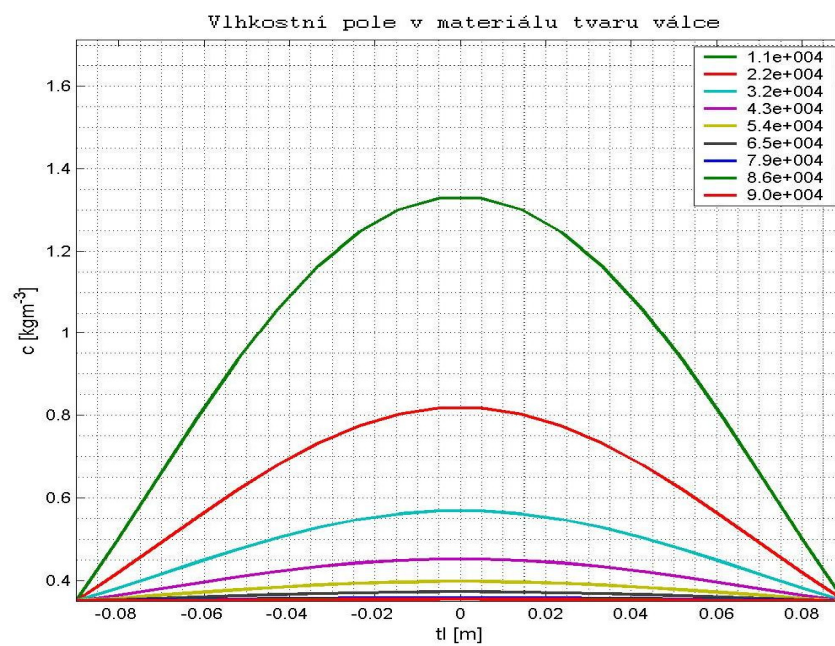


Obrázek 36 Grafické srovnání sušícího cyklu vzorku 3/I a aplikované koule [20]

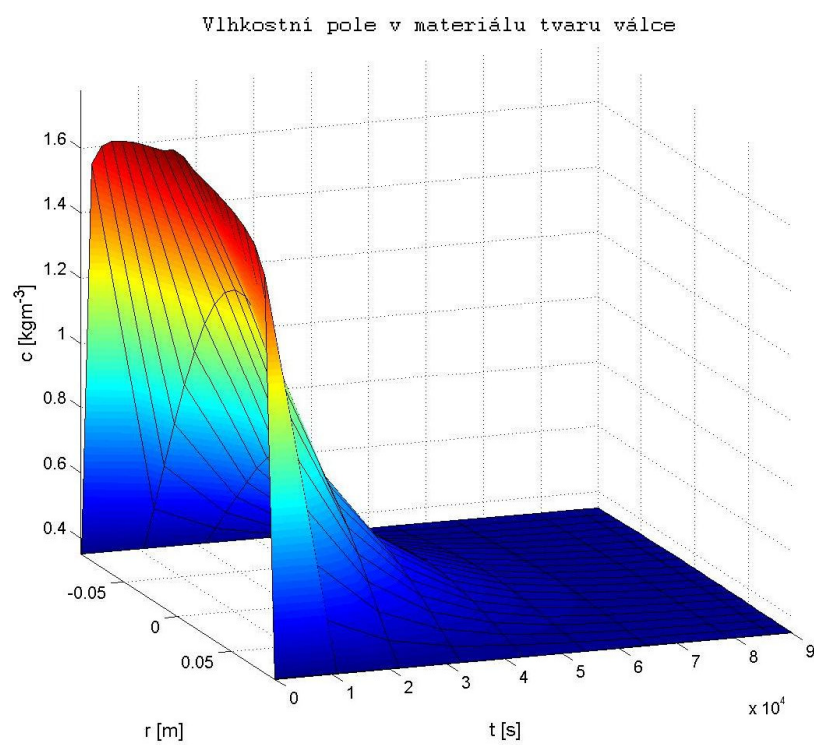
Obrázky 38 a39 popisují rozložení vlhkosti v sádrovém jádru pro vybrané doby vysoušení. Pro popis koncentračních polí byl použit matematický vztah č. 10.



Obrázek 37 Grafické srovnání sušícího cyklu vzorku 3/1 a aplikované vzorků desky, válce a koule [20]



Obrázek 38 Vlhkostní pole v materiálu tvaru válce [20]



Obrázek 39 3D model vlhkostního pole v materiálu tvaru válce [20]

ZÁVĚR

Z výsledků experimentálního měření plyne, že sušení jader by bylo možno ukončit již po 22 hodinách, kdy vlhkost klesne v měřených sádrových jádrech na hodnotu průměrně 11%. Hodnota vysoušení sádrových vzorků po více než 22 hodinách sušení klesne již jen asi o pouhých 0,02 g do konce sušicího procesu.

Náklady na proces vysoušení sádrových jader by se tímto zjištěním nesnížily a to s ohledem na skutečnost, že od 22 hodiny sušení nedochází k zahřívání sušících pecí, ale již jen postupnému řízenému klesání teploty v prostoru vysoušecích pecí a tím i pozvolnému vytvrdnutí sádrových jader.

Dále se podařilo potvrdit, že teplota a vlhkost okolního prostředí, ze kterého je nasáván a následně ohříván vzduch vháněný do sušících pecí, nemá vliv na proces sušení. Teplotní a vlhkostní rozdíly jsou plně eliminovány technologií sušících pecí.

Na základě použitého difúzního modelu popisujícího průběh úbytku vlhkostních polí ve vysoušeném sádrovém jádru, došlo ke stanovení teplotních úbytků vlhkosti a experimentálně naměřených sušících křivek sádrového jádra. Lze konstatovat, že použitý difúzní model je pro postup vysoušení vhodný, což znamená, že známe-li počáteční vlhkost daného sušeného sádrového jádra a vlhkost okolního prostředí, potom lze na základě použití difúzního modelu predikovat dobu sušení příslušného jádra, aniž bychom vždy byli nuceni měřit sušící křivku daného jádra.

Z výše uvedených výsledků se neprokázalo, že by proces, který je v současnosti ve VFB při výrobě sádrových jader aplikován, měl zásadní vliv na zmetkovost při procesu výroby hliníkových segmentů (forem). Vlhkosti mnou měřených sádrových jader vykazovaly toleranci v rozsahu pouze $\pm 0,1$ % vlhkosti.

K vyloučení všech dalších možných souvislostí, které ovlivňují zmetkovost hliníkových forem, by bylo nutné se zabývat procesem po delší dobu, vyhodnotit dobu a podmínky skladování sádrových jader před litím hliníkových forem a také kvalitou použitého hliníku. S jistotou by se dalo vysledovat, jaký vliv pro sušení by mohla mít i změna sušicího procesu (teplota a čas).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Zvoníček, J.: Sušárny, ČVUT Praha, 1976
- [2] Janáčková, D.: Sušení [online]. [2011] [cit. 2011- 02- 27].
Dostupný z WWW: <http://vyuka.fai.utb.cz/file.php?file=%2F42%2FSuseni_20_08-09_moodle.pdf>
- [3] Kolomazník, K.: Modelování zpracovatelských procesů, VUT Brno, FT Zlín, 1990, ISBN 80-214-014-1
- [4] Maňas, M., Staňek, M., Maňas, D.: Výrobní stroje a zařízení I, UTB Zlín, FT Zlín, 2007, ISBN 978-80-7318-596-1
- [5] Kolomazník, K., Sedlář, J., Macháčová, A.: Teorie technologických procesů III, VUT Brno, FT Zlín, 1978
- [6] Maňas, M., Tomis, F.: Výrobní stroje a zařízení, Gumárenské a plastikářské stroje I, VUT Brno, 1987, ISBN 978-80-7318-596-1
- [7] Maňas, M., Tomis, F.: Výrobní stroje a zařízení, Gumárenské a plastikářské stroje II, VUT Brno, 1990, ISBN 978-80-7318-596-1
- [8] Michailev, M. A.: Základy sdílení tepla, SNTL Praha 1953
- [9] Wikrent, M.: Technická dokumentace fy. MIWY, Elektrické odporové pece, Lipník n. B. 2000
- [10] Špergl, P.: Technická dokumentace fy. ZES Praha, Elektrické odporové pece, Praha, 2002
- [11] Drábek, D., Klepáč, J.: Procesné strojnictvo II, STU Bratislava, 2000, ISBN 80-227-1340-596-6
- [12] Kolat, P.: Přenos tepla a hmoty, FS, VŠB – TU Ostrava, 2001
- [13] Ramzík, Z.: Přenos tepla a hmoty, VUT Brno, 1982
- [14] Co je to sádra.: Savage desing [online]. [2011] [cit. 2011- 02- 27].
Dostupný z WWW: <<http://www.savagedesing.net/>>
- [15] Rocenka nerostnych surovim / Mineral Commodity Yearbook [online]. [2011] [cit. 2011- 02- 15]. Dostupný z WWW: <<http://www.geofond.cz/>>

- [16] Kvantitativní využití bassanitu a možnosti praktického využití [online]. [2011] [cit. 2011- 03- 03]. Dostupný z WWW: <<http://www.is.muni.cz/>>
- [17] Sádra - Wikiskripta [online]. [2011] [cit. 2011- 01- 22].
Dostupný z WWW: <<http://www.wikiskripta.eu/index.php/>>
- [18] Anorganická pojiva [online]. [2011] [cit. 2011- 03- 07].
Dostupný z WWW: <<http://www.geologie.vsb.cz/>>
- [19] Sádra – Seminarky.cz [online]. [2011] [cit. 2011- 02- 02].
Dostupný z WWW: <<http://www.seminarky.cz/detaily-20505>>
- [20] Grygar, V.: Modelování sušícího procesu pro materiály tvaru válce (diplomová práce), FAI, UTB Zlín, 2011, vedoucí doc. Ing. Dagmar Janáčková, CSc.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AG Akciová společnost

TPV Technická příprava výroby

VFB Výroba forem Barum

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1 Sušící křivka
- Obrázek 2 Světová ložiska a producenti sádry
- Obrázek 3 Model s umělého dřeva s vyfrézovaným dezénem
- Obrázek 4 Flexibelová kopie modelu s částečně vloženými lamelami
- Obrázek 5 Sádrové jádro (jádřínek)
- Obrázek 6 Složený celokruh na licí desce
- Obrázek 7 Písková forma
- Obrázek 8 Hliníkový odlitek v pískové formě
- Obrázek 9 Odlitý celokruh (surový stav)
- Obrázek 10 Řediny vzniklé nežádoucí chemickou reakcí
- Obrázek 11 Chybějící materiál bočního pásku
- Obrázek 12 Vysoké výronky na žebrech
- Obrázek 13 Vyvařené propadliny
- Obrázek 14 Schéma technologického popisu výroby hliníkového odlitku
- Obrázek 15 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 3/I
- Obrázek 16 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 4/I
- Obrázek 17 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 6/I
- Obrázek 18 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 7/I
- Obrázek 19 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 3/II
- Obrázek 20 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 4/II
- Obrázek 21 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 6/II
- Obrázek 22 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 7/II
- Obrázek 23 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 3/III
- Obrázek 24 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 4/III
- Obrázek 25 Grafické vyhodnocení sušícího cyklu vzorku 6/III

- Obrázek 26 Grafické vyhodnocení sušicího cyklu vzorku 7/III
- Obrázek 27 Grafické vyhodnocení sušicího cyklu vzorku 3/IV
- Obrázek 28 Grafické vyhodnocení sušicího cyklu vzorku 4/IV
- Obrázek 29 Grafické vyhodnocení sušicího cyklu vzorku 6/IV
- Obrázek 30 Grafické vyhodnocení sušicího cyklu vzorku 7/IV
- Obrázek 31 Měření hmotnosti sádrového jádra
- Obrázek 32 Měření vnitřní vlhkosti a teploty sádrového jádra
- Obrázek 33 Umístění vsázky v sušárně
- Obrázek 34 Grafické srovnání sušicího cyklu vzorku 3/I a aplikované desky
- Obrázek 35 Grafické srovnání sušicího cyklu vzorku 3/I a aplikovaného válce
- Obrázek 36 Grafické srovnání sušicího cyklu vzorku 3/I a aplikované koule
- Obrázek 37 Grafické srovnání sušicího cyklu vzorku 3/I a aplikované vzorků desky, válce a koule
- Obrázek 38 Vlhkostní pole v materiálu tvaru válce
- Obrázek 39 3D model vlhkostního pole v materiálu tvaru válce

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Rozdělení sádry podle typu
Tabulka 2	Rozdělení sádry podle použití
Tabulka 3	Rozdělení sádry podle doby tuhnutí
Tabulka 4	Rozdělení sádry podle vlastností
Tabulka 5	Vyhodnocení vzorků 3/I; 4/I; 6/I; 7/I
Tabulka 6	Vyhodnocení vzorků 3/II; 4/II; 6/II; 7/II
Tabulka 7	Vyhodnocení vzorků 3/III; 4/III; 6/III; 7/III
Tabulka 8	Vyhodnocení vzorků 3/IV; 4/IV; 6/IV; 7/IV.
Tabulka 9	Zadané hodnoty pro aplikaci matematického modelu