



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV PROCESNÍCH PARAMETRŮ ZAŘÍZENÍ CYCLONE NA
KVALITU KERAMICKÝCH SKOŘEPIN**

INFLUENCE OF CYCLONE PROCESS PARAMETERS ON THE QUALITY OF CERAMIC SHELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vojtěch Lederer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Vojtěch Lederer**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv procesních parametrů zařízení Cyclone na kvalitu keramických skořepin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba keramických skořepin je ve standardních provozních podmínkách limitována dobou sušení jednotlivých vrstev skořepiny. Odbor slévárenství na svém pracovišti disponuje novým zařízením Cyclone, které je určeno pro prototypovou výrobu keramických skořepin. Toto zařízení svým inovativním konceptem vysoušení keramických skořepin umožňuje zkrácení výrobního cyklu skořepiny z řádu dnů na úroveň několika hodin. S tímto je však spojena nutnost získání know-how včetně nastavení optimálních procesních parametrů stroje tak, aby byla zajištěna vysoká kvalita vyráběných skořepin.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je testování vlivu základních procesních parametrů zařízení Cyclone na kvalitu a vlastnosti vyráběných keramických forem. Práce bude zaměřena na fázi přípravy modelu a keramické suspenze, optimalizaci způsobu namáčení voskových stromečků, nanášení posypů a parametry sušení keramické formy. Dílčím cílem bude sestavení metodiky pro kontrolu kvality vyráběných skořepin na zařízení Cyklon. Vyrobené skořepiny způsobem rychlého prototypování budou následně vyhodnoceny a porovnány se skořepinami vyráběnými v běžných výrobních provozech.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, P.R., R.F. SMART. Investment Casting. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 0-901716-66-9.

JONES, S., C. YUAN. Advances in shell moulding for investment casting, Journal of Materials Processing Technology, Volume 135, Issues 2 – 3, 2003, pp. 258 - 265. ISSN 0924-0136.

STEFANESCU, D.M. Science and engineering of casting solidification. 2nd ed. New York: Springer, 2009. ISBN 978-0-387-74-609-8.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce obsahuje úvod do problematiky sušení skořepin, jeho monitorování a vlivu na vlastnosti skořepin. V práci je experimentováno se zařízením Cyclone, které je dále popsáno. Je zkoumán proces sušení skořepin v zařízení a jsou prováděny experimenty rozšiřující pochopení funkcí a parametrů procesu rychlého sušení. Jsou prováděny experimenty srovnávající průběhy sušení při konkrétních nastaveních zařízení Cyclone a při běžném sušení v klimatizované místnosti. Také jsou srovnávány mechanické vlastnosti běžně sušených skořepin a skořepin vyráběných v zařízení Cyclone. Byl ověřen pozitivní vliv zařízení na výslednou pevnost skořepin i pozitivní vliv na rychlost sušení.

Klíčová slova

Přesné lití, keramické skořepiny, rychlé sušení.

ABSTRACT

Diploma thesis contains introduction into shell drying, its monitoring and influence on shell properties. The thesis works with the Cyclone machine described further. The shell drying process in the machine and experiments are carried out broadening understanding of functions and parameters of rapid drying process. Experiments comparing courses of drying under respective settings of Cyclone and under common drying in air-conditioned room are carried out. Also mechanical properties of commonly dried shells and shells made by the Cyclone machines are compared. The positive effect of the machine on the ultimate strenght of dried shells and positive effect on the drying speed has been confirmed.

Key words

Investment casting, ceramic shell, rapid drying.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LEDERER, Vojtěch. *Vliv procesních parametrů zařízení Cyclone na kvalitu keramických skořepin* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124351>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv procesních parametrů zařízení Cyclone na kvalitu keramických** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Vojtěch Lederer

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Vladimíru Krutišovi, Ph.D. za jeho cenné rady, vytrvalou pomoc a trpělivé vedení této diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Josefu Zapletalovi Ph.D. za pomoc při realizaci zkoušek pevnosti v ohybu.

Na závěr bych chtěl poděkovat všem zaměstnancům odboru slévárenství při VUT za jejich pomoc ve všech směrech.

OBSAH

Úvod.....	8
1 Sušení skořepin.....	9
1.1 Monitorování sušení skořepin	10
1.1.1 Metoda měření elektrického odporu.....	11
1.1.2 Metoda měření teploty	12
1.1.3 Metoda měření vlhkosti.....	13
1.1.4 Ultrazvuková metoda	14
1.1.5 Metoda vážení	15
1.2 Vliv sušení na vlastnosti skořepiny	16
2 Zařízení Cyclone	20
2.1 Nádrže na břečku.....	24
2.2 Sprchový posyp	26
2.3 Pohonná jednotka	29
2.4 Sušící komora.....	30
3 Sledované parametry skořepin a jejich měření	32
3.1 Pevnost v ohybu	32
3.1.1 Tříbodový ohyb	33
3.1.2 Čtyřbodový ohyb.....	33
3.2 Prodyšnost.....	34
3.3 Kombinovaná zkouška.....	35
4 Experimentální část	37
4.1 Zkušební tělesa.....	37
4.2 Použité materiály	37
4.3 Vliv prvků sušící komory	38
4.4 Vliv teploty a vlhkosti.....	42
4.5 Sušení uzavřených a otevřených tvarů	47
4.6 Sušení při více obalech.....	51
4.7 Porovnání pevností	55
Závěr.....	60
Bibliografie	61

ÚVOD

Lití metodou vytavitelného modelu je technologie produkující výrobky finálních rozměrů, nebo rozměrů velmi blízko hotovému což poskytuje konstruktérům účinný a ekonomický způsob, jak vyrobit finální výrobek, ale také přispívá ke snížení nákladů na materiál a energii [1]. V poslední době dochází k nahrazování břeček založených na alkoholu z několika důvodů. Jedním z důvodů jsou nižší náklady na břečky na vodní bázi. [2]. Břečky na vodní bázi umožňují delší manipulační časy, což umožňuje rovnoměrné pokrytí posypem a pokrytí celého povrchu [3]. Mnohem vážnější důvody pro upouštění od alkosolů jsou ovšem zdravotní, bezpečnostní a ekologické [2] [4]. Především se jedná o zpřísnění maximálních povolených koncentrací a riziko vzplanutí či exploze par. S tímto přechodem je bohužel spojena jedna zásadní nevýhoda: sušící časy skořepin narostly dva až třikrát [2]. Sušící časy tvoří až 95 % procesu [2]. Pro zrychlení a s tím související efektivitu procesu se tedy jeví optimální zaměřit se na proces sušení.

Této příležitosti se chopila německá firma MK Technology GmbH, které vyvinula a vyrobila zařízení Cyclone. Výrobce uvádí, že by mělo být možné vyrobit pevnou skořepinu během sedmi hodin, namísto sedmi dní [2]. Výrobce uvádí, že skořepina sušená touto technologií navíc disponuje vyšší pevností, než skořepina sušená konvenčně [2]. Tyto vlastnosti slibují v kombinaci s metodami Rapid Prototyping efektivní možnost rychlé výroby zkušebních součástí či ověření technologie.

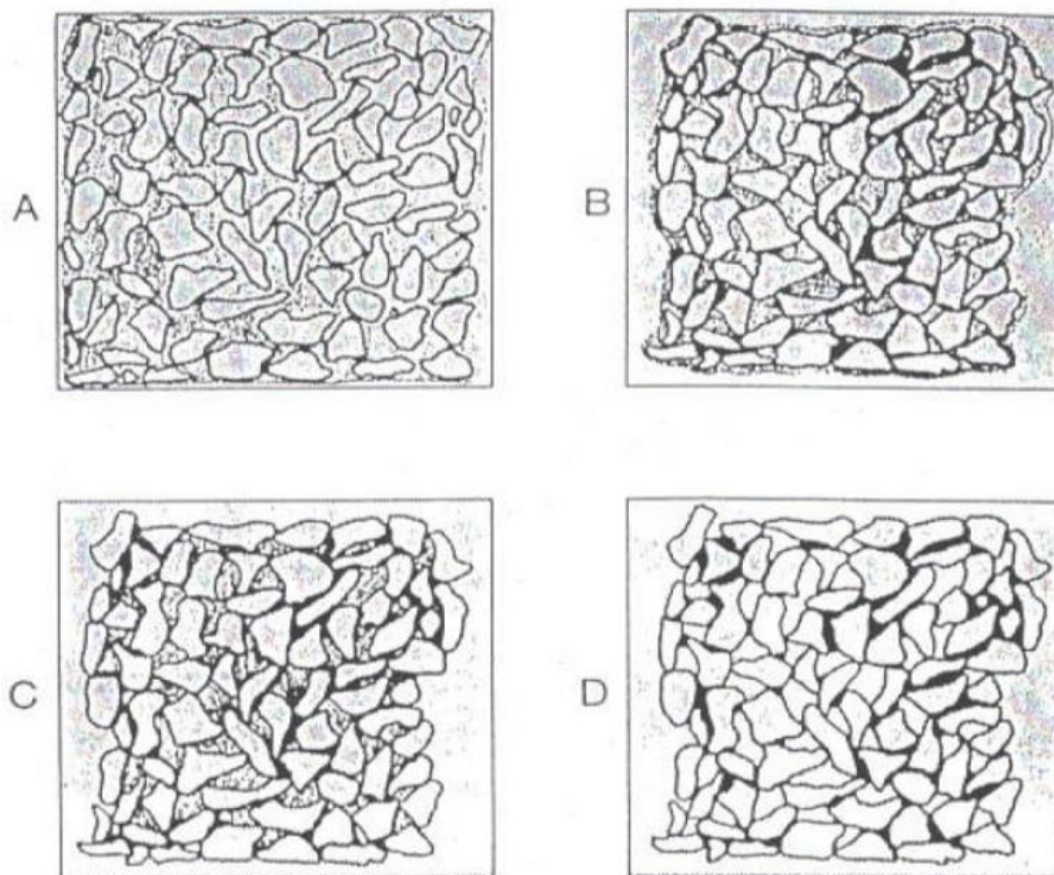
Tato práce se bude věnuje břečkám založeným na vodní bázi. Ethylsilikátové břečky nejsou v této práci rozebírány. Hlavním předmětem této práce je sušení skořepin, vyhodnocování vlivů parametrů sušení a vyhodnocování mechanických parametrů výsledných skořepin. V první části práce je rozebrána teorie sušení. V druhé části je popsáno zařízení Cyclone a některé jeho detaily. Ve třetí části jsou přiblíženy některé mechanické a technologické zkoušky skořepin. Ve čtvrté části jsou prováděny experimenty za účelem ověření některých parametrů a vlastností stroje a lepšího pochopení jeho částí.

1 SUŠENÍ SKOŘEPIN

Sušení bylo studováno dlouhá léta, neboť je důležitým krokem při výrobě keramických výrobků [5]. Většina monolitických keramických těles musí být sušena pečlivě a kontrolovaně, jinak dochází k praskání a deformacím [5]. Vrstvení skořepiny po jednotlivých obalech však přináší značně větší flexibilitu, vzhledem k rozprostření břečky po mnohem větší ploše a mnohem menší tloušťce [5]. Zároveň posyp pokrývá velkou část povrchu břečky, čímž přispívá ke zpomalení rychlosti sušení [5].

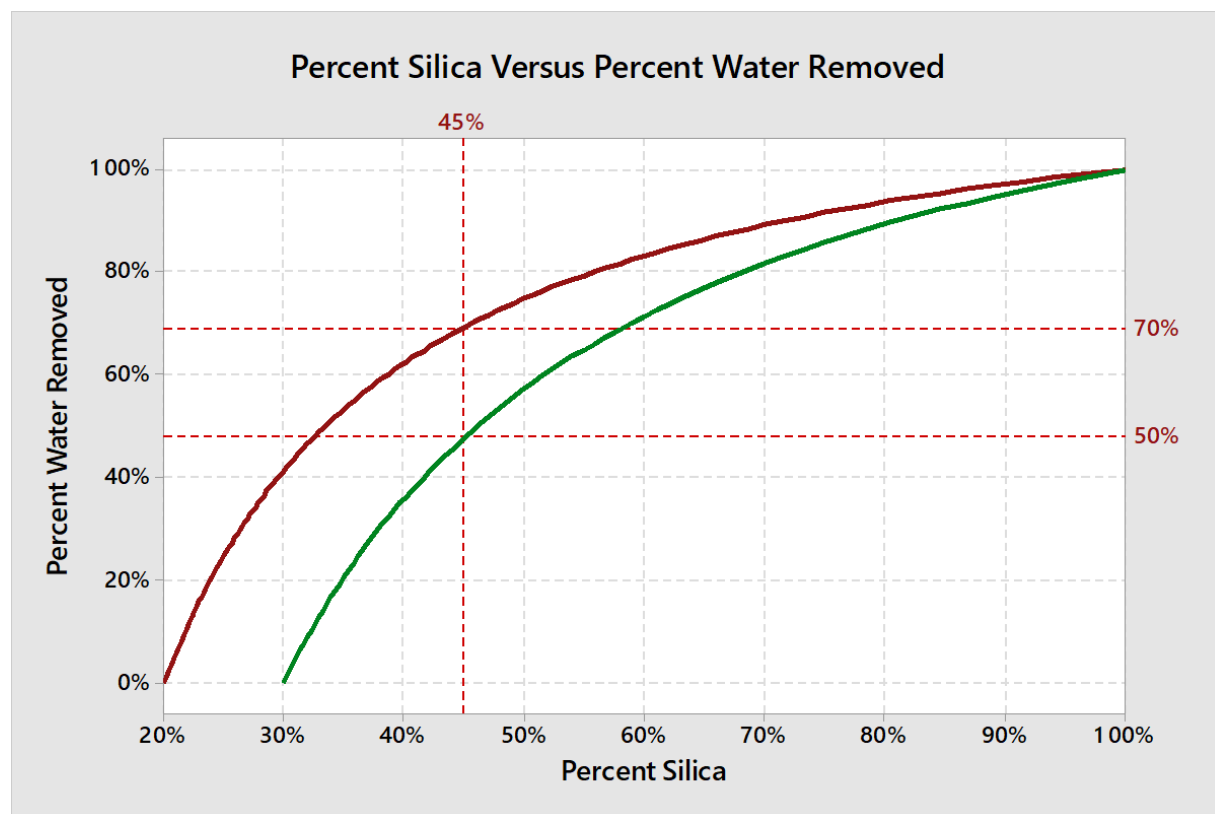
Hlavními faktory při sušení jsou teplota, vlhkost a průtok okolního vzduchu [6]. Sušení keramiky probíhá přeměnou vody z kapalného stavu do plynného [6]. K dosažení této přeměny je nutná tepelná energie, kterou obvykle označujeme jako latentní teplo [6]. Tato energie je odebírána sušenému materiálu čímž dochází k jeho chladnutí. Při příliš rychlém sušení může docházet ke smršťování modelu, zatímco obal ještě není vytvrzen [4]. Když sušení zpomaluje model se postupně vrací na původní teplotu a dochází k jeho rozpínání, což může způsobit praskání obalu [4]. O popis termodynamických pochodů při sušení se zasadila práce Zawati Harun [7], kde je rozebírán numerický výpočet těchto pochodů, což by mohlo být do budoucna značným přínosem pro možnost predikce a simulace procesu sušení.

Velmi důležitým procesem při sušení skořepin je gelace. Je to proces, kdy je stabilní koloidní roztok udržovaný elektrickými silami vyveden z rovnováhy, částice se přestanou odpuzovat a dochází k jejich shlukování a vzájemnému kontaktu, čímž vznikne porézní trojrozměrná síť, v jejíž pórech jsou uzavřeny zbytky kapaliny (viz obr. 1) [1].



Obr. 1 Průběh gelace [5]

Důvodů ke gelaci břechky může být více, mnohdy nežádoucích, jako jsou např. kontaminace bakteriemi, solí (obvykle z moučky používané k výrobě břechky) či používání vody z kohoutku [1]. Gelace při sušení probíhá na základě odpařování vody z břechky, čímž dochází ke zvyšování koncentrace pojiva [1]. Je tedy nutné odstranit minimálně takové množství vody, aby došlo k překročení koagulačního prahu, čímž dojde ke gelaci [8]. Koagulační práh je ovlivněn vlastnostmi pojiva, jako je velikost částic, ale hlavně jeho koncentrace [8]. Přibližně 70% vody je potřeba odstranit z břechky obsahující 20% siliky, zatímco pro břechku obsahující 30% siliky stačí odstranit 50% vody (viz obr. 2) [8].



Obr. 2 Odstraněná voda v závislosti na obsahu siliky při koagulačním prahu 45 % [8]

Po úvodní gelaci břechky dochází k dalším vazbám mezi částicemi a struktura se po určitou dobu smršťuje [1]. Tento proces je doprovázen vylučováním vody ze struktury gelu, a to dokonce i pokud je vzorek ponořen do alkoholu, neboť voda je vytlačována vznikajícími vazbami a smršťováním struktury [1]. Smršťování je pro gelaci charakteristické a vždy je doprovázeno mikrotrhlinami [1]. Póry v síťové struktuře stále udržují vodu, která vydrží ve struktuře až do teploty přibližně 1000 °C [1]. Produkt gelace v syrové vysušené formě je silikagel, stejný jako je používán v pohlcovačích vlhkosti, který je schopen absorbovat vlhkost, která je vypuzena při teplotě 300 °C [1].

1.1 Monitorování sušení skořepin

Z důvodu úspory procesních časů je tedy nutné stanovit či rozpoznat, kdy je skořepina dostatečně vysušena. Vysušená skořepina by měla „být zbavena vlhkosti“ [5]. Tato formulace je teoreticky jasná, avšak praktická aplikace je mnohdy obtížná. Určení momentu, kdy je vrstva skořepiny vysušena je však zásadní pro jakoukoliv úsporu procesního času, neboť veškerý čas po tomto momentu, který skořepina stráví

v sušícím zařízení, je neproduktivní. Je používáno několik metod, které mají svůj přínos, avšak nemusí se hodit do každého provozu [5].

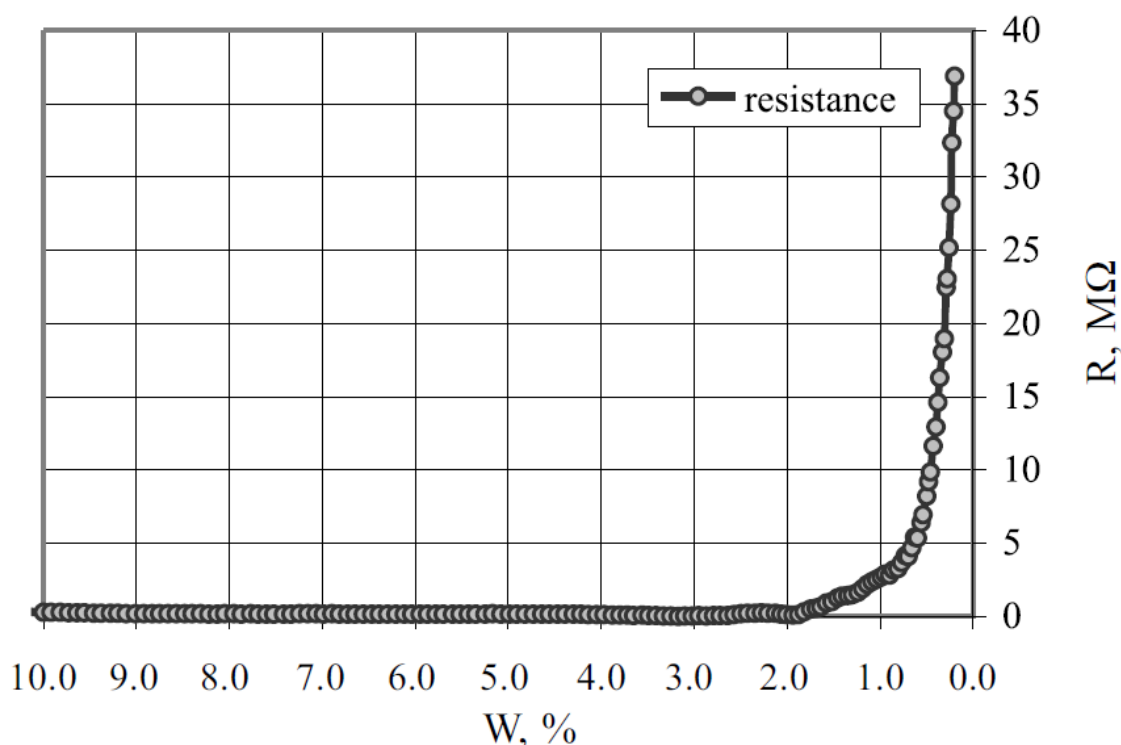
1.1.1 Metoda měření elektrického odporu

Suchá keramická skořepina je velice špatným vodičem elektřiny, zatímco vlhká skořepina je dobrým vodičem [8]. Měření je realizováno ať už přímým nebo nepřímým měřením odporu mezi dvěma elektrodami, které jsou obaleny ve schnoucí skořepině (viz obr. 3).



Obr. 3 Elektrody zapojené ve vzorku [9]

Proud je veden vrstvou skořepiny v kontaktu s modelem nehledě na postupování sušení až do chvíle, kdy se v této vrstvě začne snižovat obsah vody [9]. Závislost obsahu vody a odporu je nelineární a větší změny se udávají až když se blíží konec sušení [8]. Po většinu měření je odpor velice nízký a konstantní (viz obr. 4) [9].

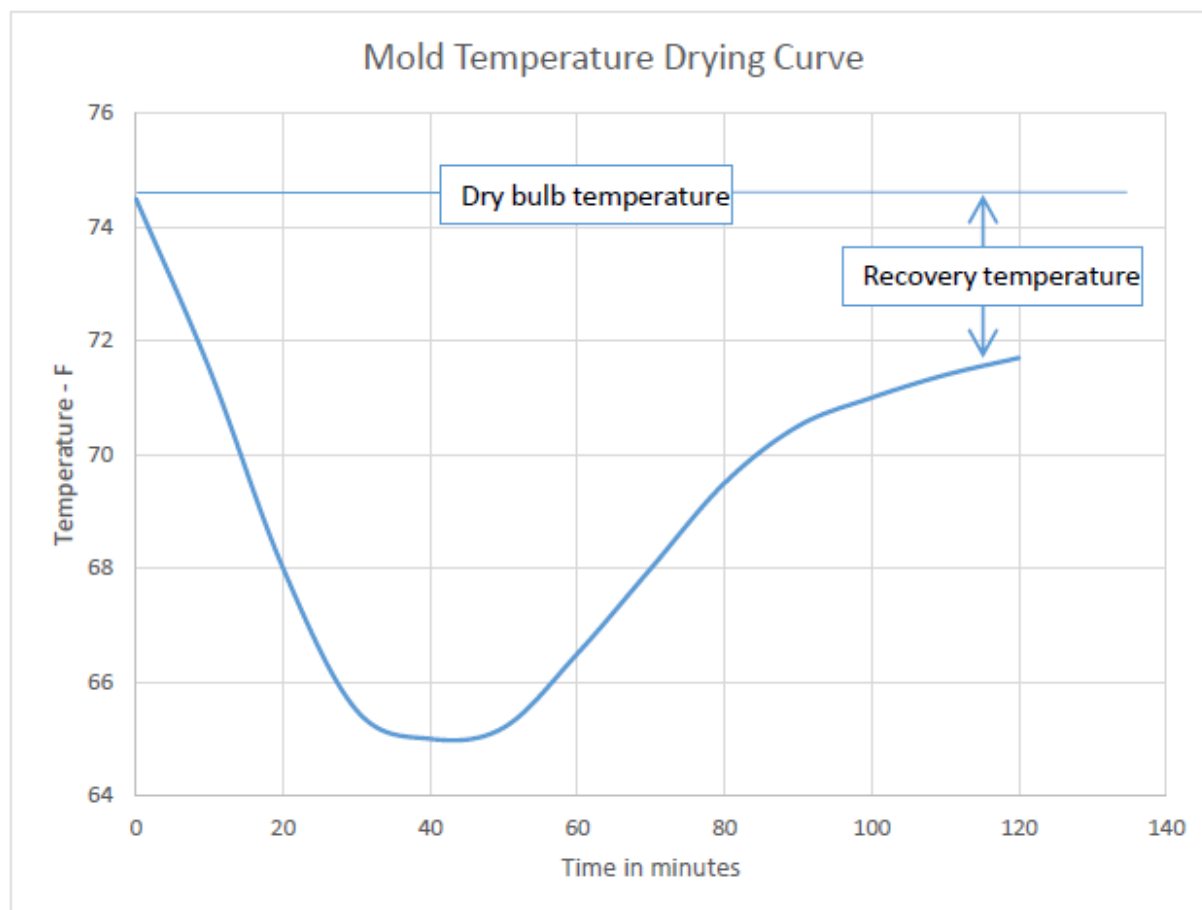


Obr. 4 Průběh odporu v závislosti na vlhkosti vzorku [9]

Z toho vyplývá, že metoda umožní obstojně rozpoznat končící sušení, avšak nedostatečně popisuje rychlost a celkový průběh sušení [8]. Také je nutno brát v potaz fakt, že metoda je založena na elektrické vodivosti materiálu, která s úplným vysušením klesá téměř k nule. Z toho plyne, že pokud oblast kolem jedné z elektrod, nebo například oblast úplně oddělující elektrody, úplně vyschne, ostatní vlhké oblasti se již do měření nepromítnou. Stejně tak tato metoda nezohledňuje oblasti, které nejsou mezi elektrodami, nebo jsou od nich úplně odděleny již vyschlou oblastí, což by v případě členitých skořepin s nerovnoměrným sušením byl pro provozní praxi problém.

1.1.2 Metoda měření teploty

Tato metoda je založena na jednoduchém principu porovnávání teploty skořepiny s teplotou suchého teploměru [8]. Během sušení dochází k poklesu teploty vlivem odpařování vody [2]. S ubývajícím množstvím odpařované vody se teplota skořepiny přibližuje teplotě suchého teploměru (viz obr. 5) [8].

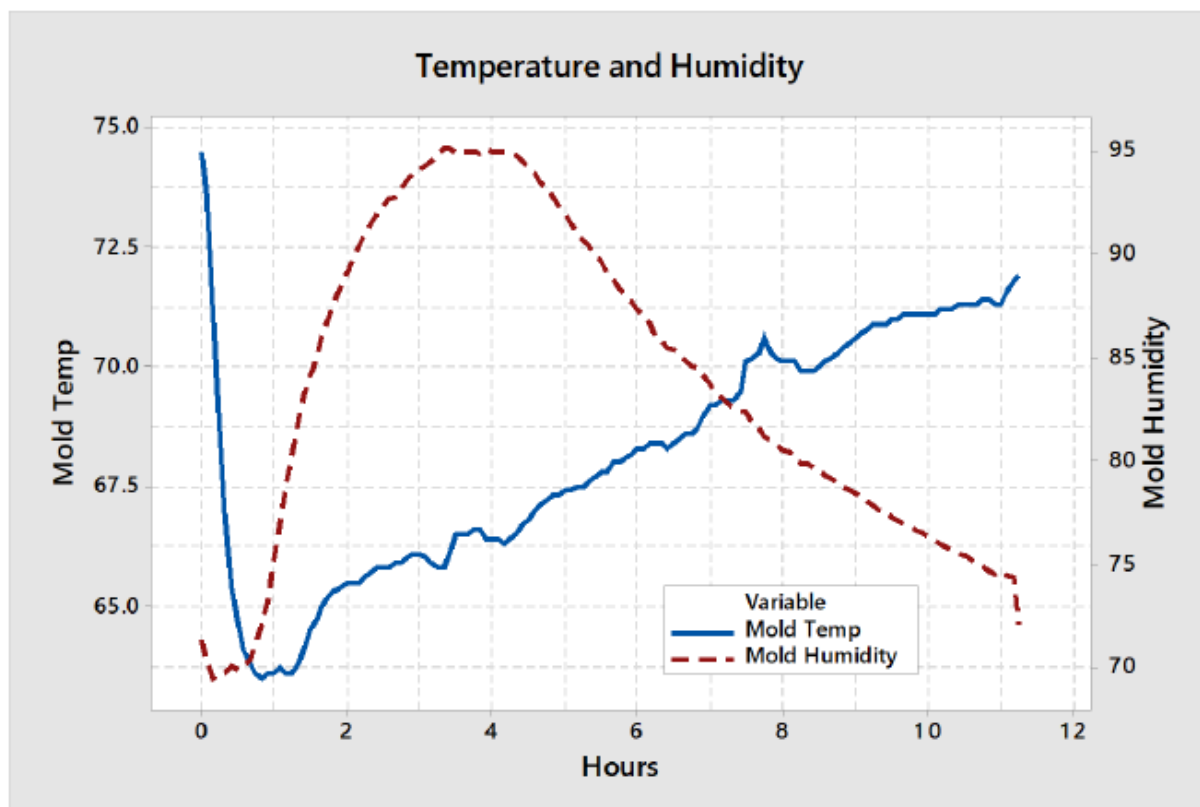


Obr. 5 Průběh skořepiny ve srovnání s teplotou suchého teploměru [8]

Rozdíl těchto teplot však nelze vykládat jako absolutní hodnotu. Při rozdílu 1° za 50% vlhkosti obsahuje skořepina více vody, než skořepina za 20% vlhkosti [8]. Teplotu skořepiny lze získávat různými způsoby. Jednou z možností je termočlánek ve voskovém modelu, čímž lze sledovat vývoj teploty v problematické oblasti, která by mohla být obtížně přístupná ostatními metodami [8]. Tento způsob měření teploty ovšem vyžaduje zásah do modelu. Bezkontaktní měření na druhou stranu mají nevýhodu, obzvláště u masivnějších skořepin, neboť měří pouze teplotu povrchu, který přirozeně schne rychleji než vnitřní obaly skořepiny. Infračervený teploměr je levnější z nekontaktních metod [8]. Termokamera umožňuje na rozdíl od infračerveného teploměru sledování celého viditelného povrchu skořepiny [8]. Tato metoda umožňuje velice dobře sledovat průběh sušení, avšak ke konci jsou změny teploty velmi malé, což dělá rozpoznání konce sušení komplikovaným. Při použití bezkontaktních způsobů měření, kdy je snímána pouze teplota povrchu, zatímco vnitřní obaly mohou zůstat vlhké. Další komplikací bezkontaktních metod je nutnost kalibrace emisivity povrchu.

1.1.3 Metoda měření vlhkosti

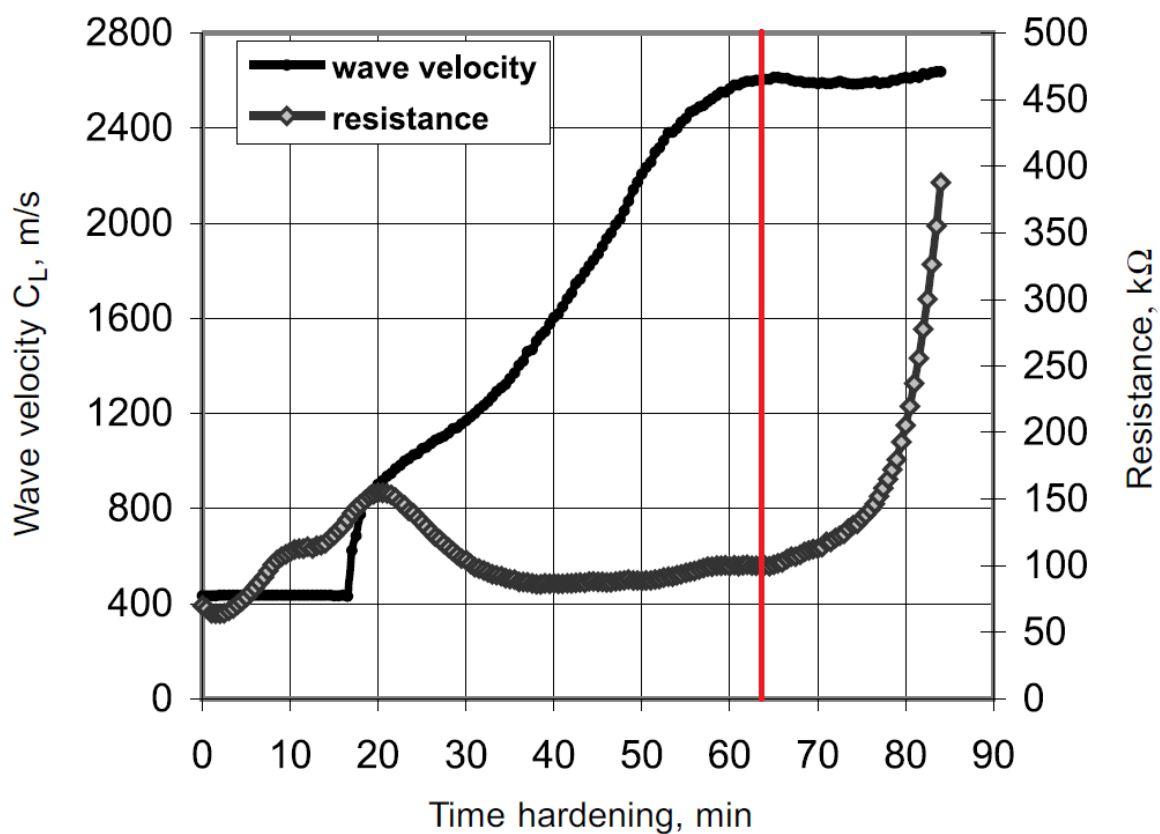
Další z možných metod je měření vlhkosti uvnitř skořepiny [8]. Tato metoda používá speciální digitální senzor uvnitř voskového modelu [8]. Senzor je chráněn voděodolnou prodyšnou tkaninou, jenž umožňuje páře prostoupit na senzor [8]. Tato metoda vyžaduje zásah do modelu stejně jako instalace termočlátku. Poskytuje dobrý obraz o průběhu sušení vnitřních obalů (viz obr. 6).



Obr. 6 Metoda měření vlhkosti s průběhem teploty pro srovnání (teplota uváděná v °F) [8]

1.1.4 Ultrazvuková metoda

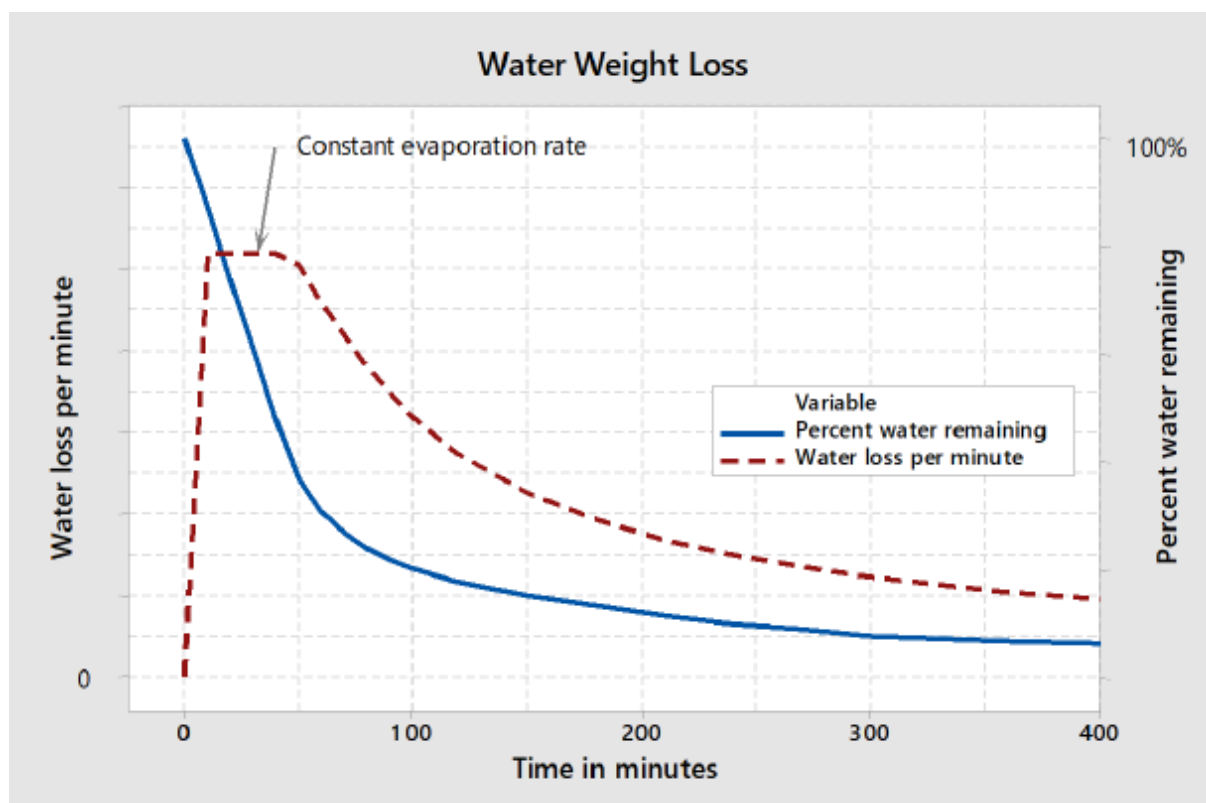
Ultrazvuková metoda je založena na vyhodnocování rychlosti šíření vlny ve vzorku [9]. Sušení a tím způsobený přechod břečky do tuhého stavu zvyšují rychlost šíření vlny [9]. V první fázi sušení dochází k odpařování přebytečné vody, avšak množství odpařené vody ještě není dostatečné, aby došlo ke gelaci a tím i změně rychlosti šíření vlny [9]. Při dalším sušení dochází ke gelaci a zvýšení rychlosti šíření vlny [9]. Ke konci sušení dosáhne rychlost šíření vlny svého maxima a dále zůstává konstantní [9]. avšak z porovnání s metodou měření elektrického odporu (viz obr. 7) vyplývá, že i po dosažení maximální rychlosti šíření vlny stále roste elektrický odpor a sušení tedy ještě pokračuje [9].



Obr. 7 Srovnání měření ultrazvuku a odporu [9]

1.1.5 Metoda vážení

Pomocí jednoduchého vážení skořepiny lze sledovat proces sušení celé skořepiny grafem hmotnosti v čase (viz obr. 8) [8].

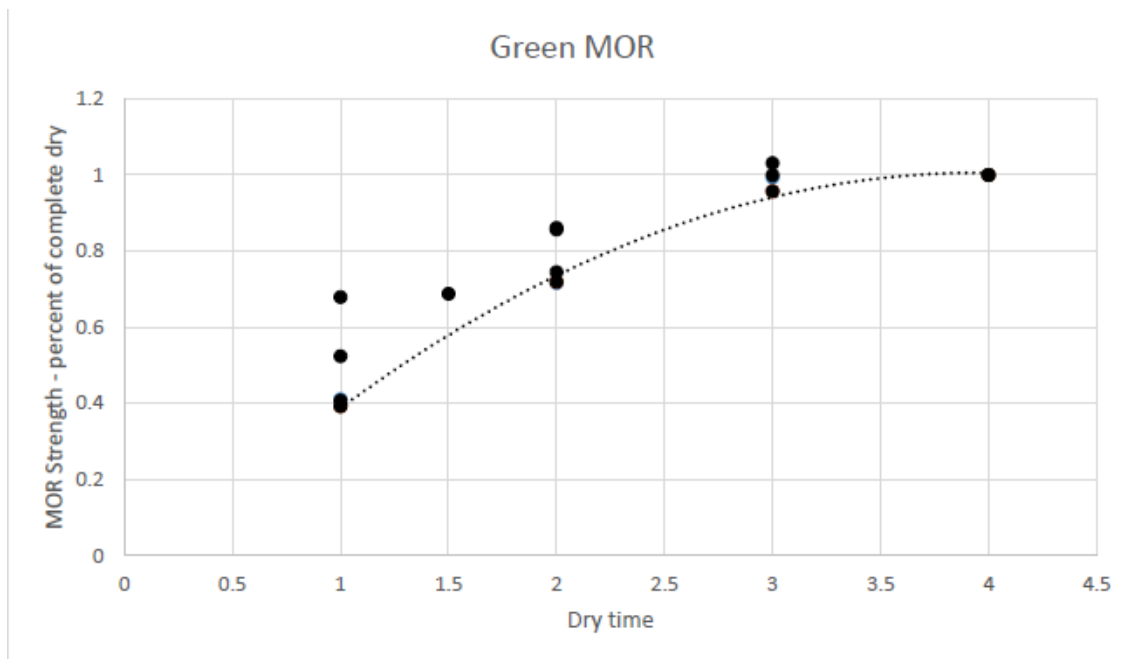


Obr. 8 Závislost hmotnosti na čase sušení [8]

Sušení v malých dutinách se projeví pouze malým úbytkem hmotnosti, čemuž je nutné přizpůsobit citlivost vážení. Výhodou této metody je absence zásahu do skořepiny či modelu a také to, že zohledňuje úbytky hmotnosti kdekoli na skořepině. Nevýhodou metody je sledování rychlosti sušení skořepiny jako celku, avšak nezohledňuje pomalu schnoucí místa, jako jsou např. díry a zahloubení.

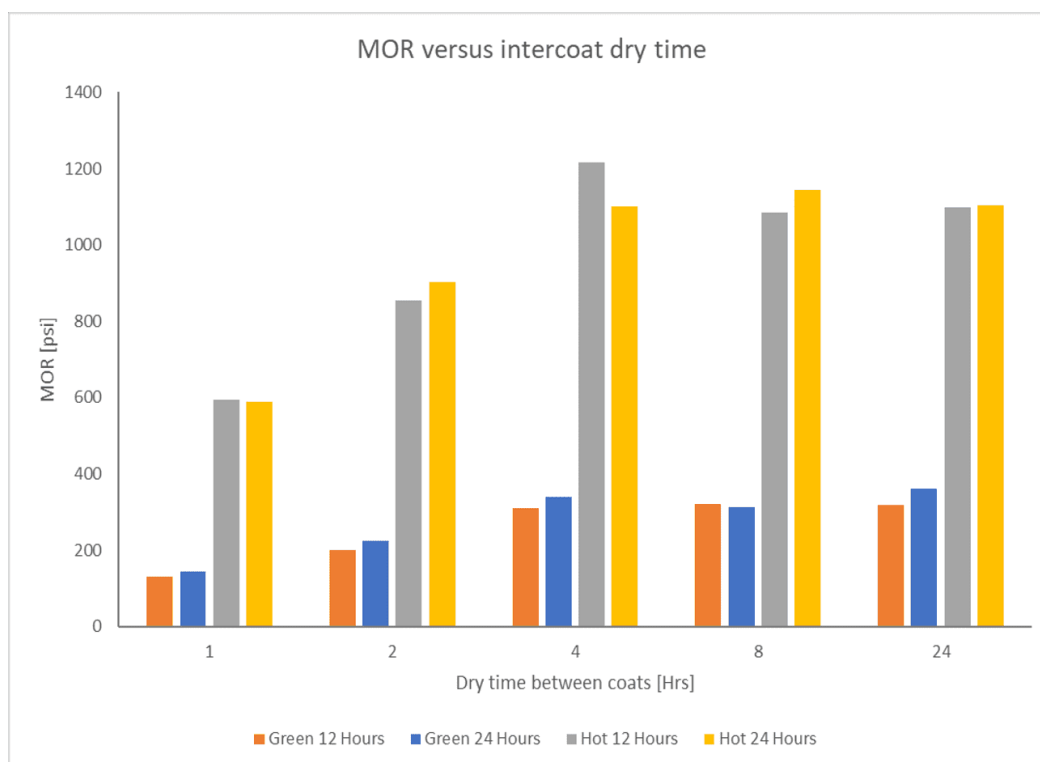
1.2 Vliv sušení na vlastnosti skořepiny

Sušení jednotlivých obalů skořepiny je velice důležité pro správnou funkci skořepiny [8]. Obecně lze říct, že čím více vody je odstraněno z každé vrstvy, tím lepší vlastnosti skořepina dosahuje a zvyšuje se kvalita výsledného odlitku [8]. Množství odstraněné vody je závislé na čase sušení (viz obr. 8), avšak s postupujícím časem sušení vzorek již neobsahuje žádnou volnou vodu, která by mohla být odstraněna, proto nedochází k dalšímu zvyšování syrové pevnosti skořepiny. Z obr. 9 vyplývá, že sušení skořepiny určitou rychlostí má význam pouze určitou dobu a poté již nepřináší další zlepšení (jiný experiment než na obr. 8).



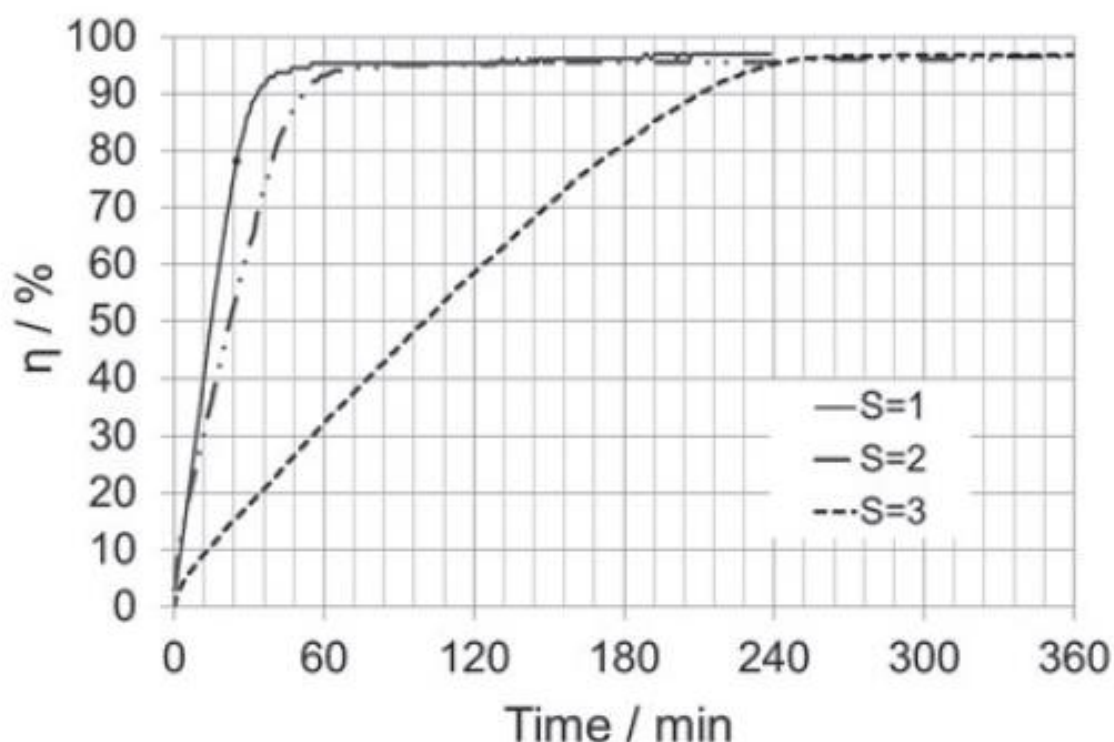
Obr. 9 Závislost syrové pevnosti skořepiny na čase sušení [8]

Manuel Guerra ve své práci [10] zkoumal vliv času sušení mezi jednotlivými obaly a času finálního sušení na syrovou pevnost a pevnost po vyžihání. Jeho výzkum obsahuje velké množství užitečných dat, která dávají do souvislosti čas sušení a pevnost skořepiny (viz obr. 10). Z dat vyplývá, že v časech finálního sušení 12 a 24 hodin není znatelný rozdíl [10]. Časy sušení mezi obaly nad 4 hodin nepřinášejí znatelné vylepšení vlastností [10]. Nedostatečné časy sušení (1 a 2 hodiny mezi obaly) snižují syrovou pevnost i pevnost po vyžihání a časy finálního sušení nemohou nahradit nedostatek sušení mezi jednotlivými obaly [10].



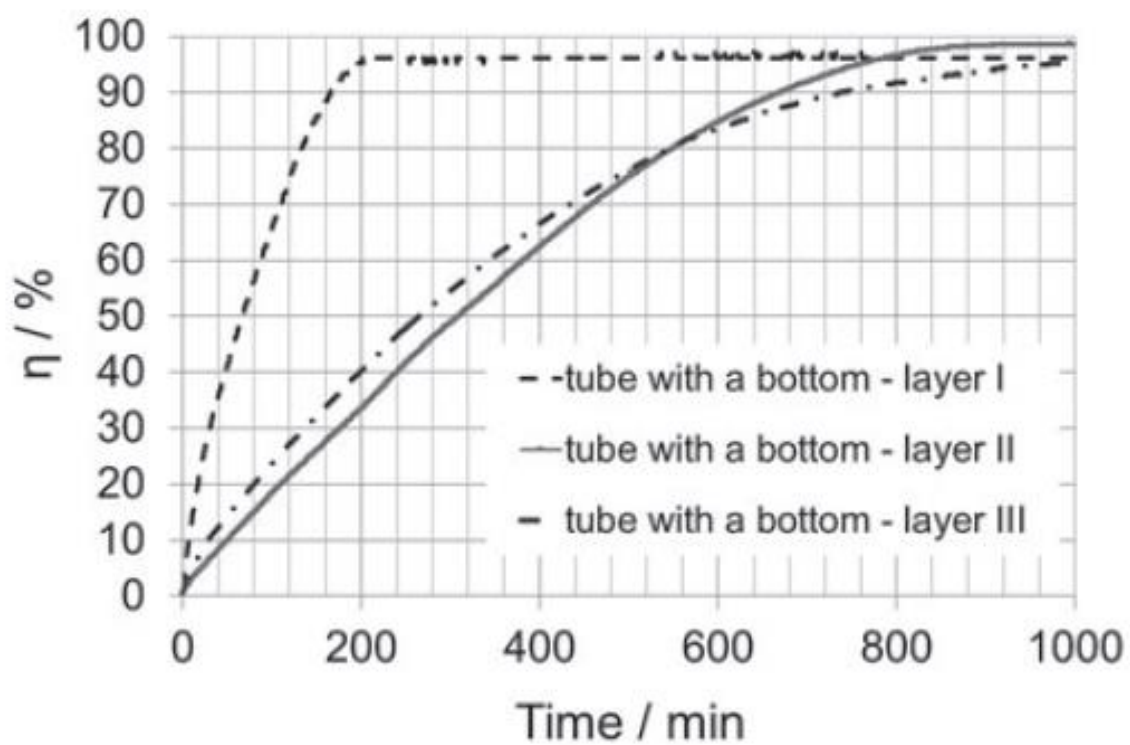
Obr. 10 Vývoj syrových pevností a pevností po vyžihání v závislosti na čase sušení a finálního sušení [10]

Bohužel většina skořepin v technické praxi má komplexní tvar, kde tenké ostré výstupky, jako např. hrany lopatek plynových turbín, schnou rychleji než rovné povrchy skořepiny, zatímco prohlubně a dutiny, jako např. náboje kol, schnou mnohem pomaleji. Uvnitř dutiny se nahromadí vlhkost vzniklá odpařováním z břečky, což zpomaluje další odpařování [11]. Toto je nutné brát v potaz při návrhu technologických časů sušení s ohledem na praskání při příliš rychlém sušení i na dostatečné vysušení před dalším namáčením. Práce [11] se zabývá vlivem průchozích i slepých děr na rychlost sušení. Z výzkumu vyplývá, že průchozí otvory o štíhlostním poměru 1 ($H = 21$ mm, $d = 25,5$ mm) a 2 ($H = 42$ mm, $d = 25,5$ mm) schnuly několikrát rychleji (viz obr. 11) než otvory se štíhlostním poměrem 3 ($H = 84$ mm, $d = 25,5$ mm) [11].



Obr. 11 Průběh sušení prvního obalu pro válcovité dutiny o různém štíhlostním poměru [11]

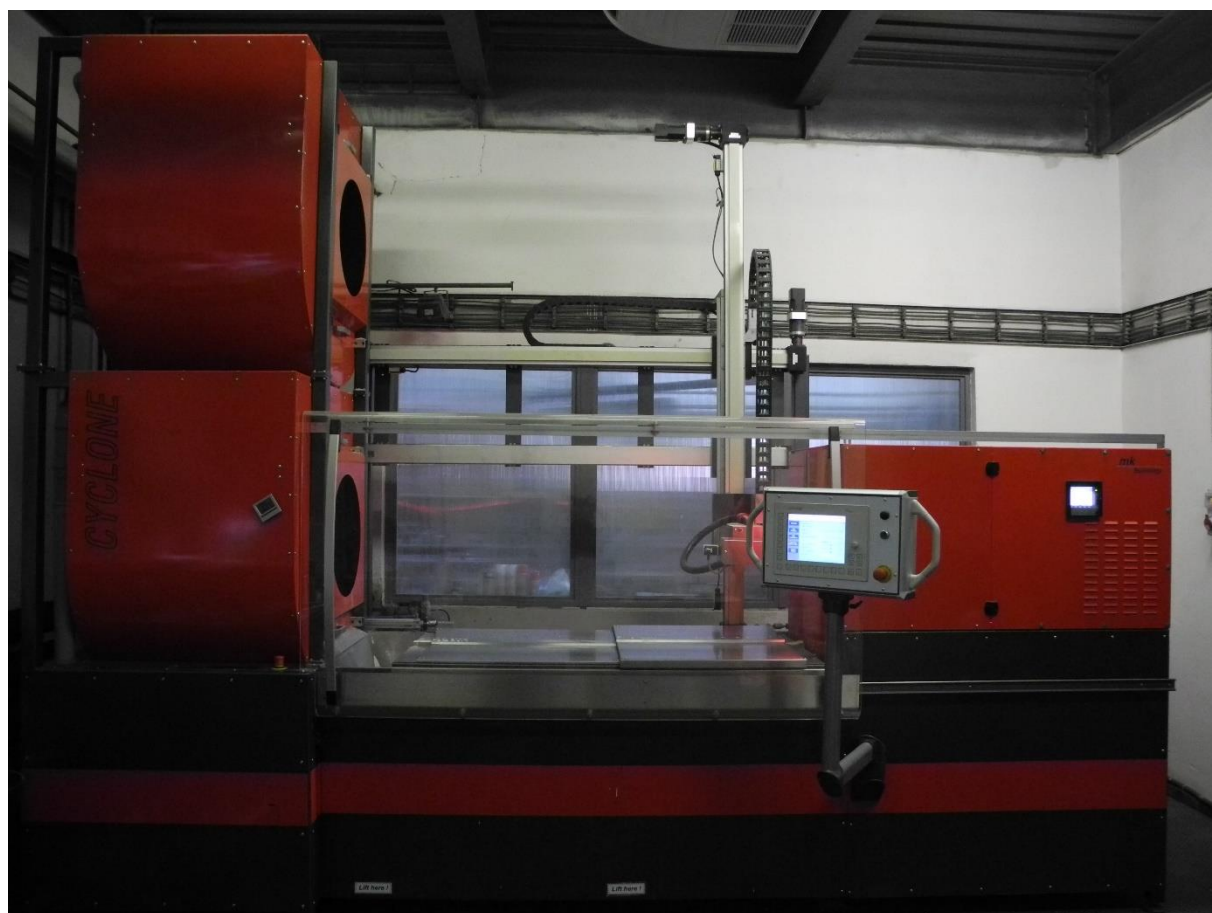
Pro slepé otvory při prvním obalu jsou patrné rozdíly už při štíhlostním poměru 2 oproti dutině se štíhlostním poměrem 1. Samotné zaslepení otvoru prodloužilo čas sušení prvního obalu v otvoru se štíhlostním poměrem 1 třiapůlkrát [11]. Množství obalů a s tím související tloušťka skořepiny také hraje velkou roli. Toto je možno pozorovat již na zaslepených dutinách o štíhlostním poměru 1 (viz obr. 12), kde sušící čas následujících obalů násobně narůstá oproti času sušení prvního obalu [11].



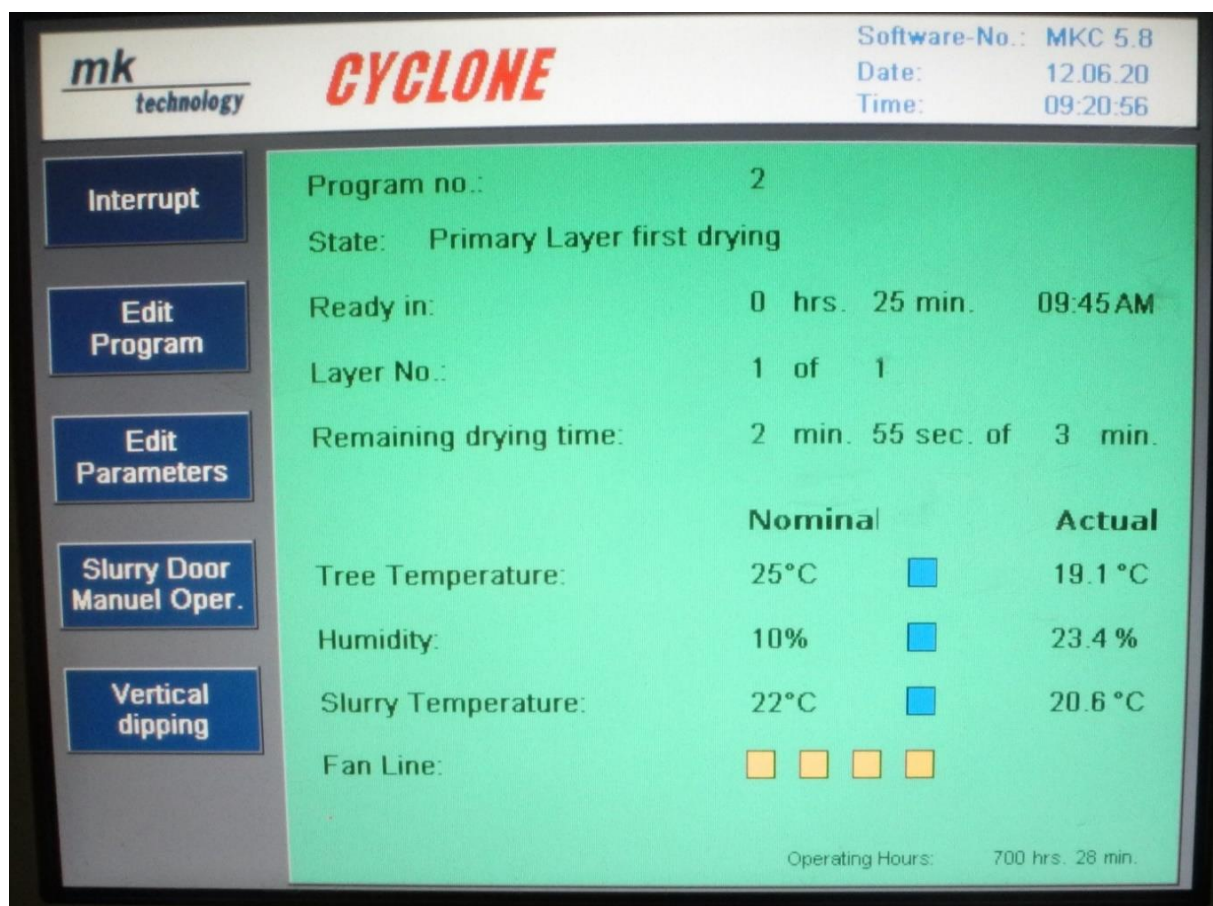
Obr. 12 Časy sušení neprůchozího válce se štíhlostním poměrem 1 pro několik obalů [11]

2 ZAŘÍZENÍ CYCLONE

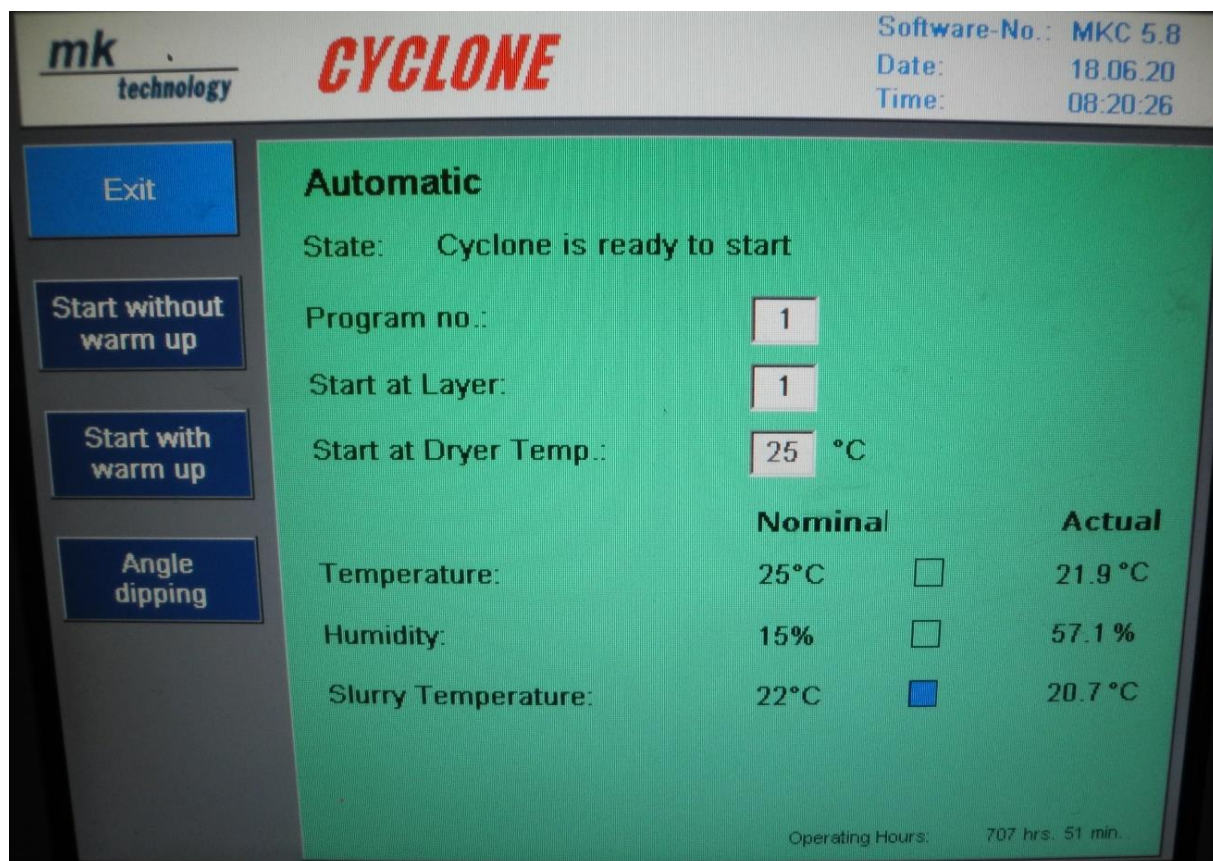
Zařízení Cyclone (viz obr. 13) se sestává ze dvou nádrží s břečkou, jedné až tří komor sprchového posypu, pohonnou jednotkou, ovládacím panelem (viz obr. 14) a konečně komorou pro rapidní sušení [12]. Zařízení pracuje automaticky (viz obr. 15) avšak jednotlivé funkce lze ovládat manuálně. V automatickém režimu vytvoří zařízení libovolný počet obalů (max. 12) podle zvoleného programu (viz obr. 16). Každý program disponuje vlastními parametry (viz obr. 17 a 18). Pro každý obal lze zvolit do které nádrže bude stromeček namáčen a ve které komoře bude stromeček posypáván. Stejně jako při běžném procesu lití metodou vytavitelného modelu stroj nejdříve namáčí modelové zařízení do břečky, poté jej okape, posype sprchovým posypem, vloží do sušící komory, kterou uzavře po dobu sušení, po jehož dokončení se cyklus opakuje.



Obr. 13 Celé zařízení cyclone



Obr. 14 Ovládací panel zařízení Cyclone během sušení



Obr. 15 Automatický režim



CYCLONE

Software-No.: MKC 5.8

Date: 18.06.20

Time: 08:20:48

Exit

Program no.:

Number of Layers:

incl. Primary Layers:

and Seal Coat ☐

Layer direct Drying ☐

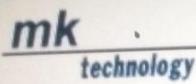
Additional Red Lights ☒

Layer	Drying time (Min.)	Tree Temp. (°C)	Dryer Humidity (%)	Fan Rows
1	25	23	15	4
2	30	23	15	4
3	35	23	10	4
4	40	23	10	4
5	40	23	10	4
6	40	23	10	4
7	40	23	10	4
8	40	23	10	4

Combination Slurry / Sand

Logoscreen Off

Obr. 16 Nastavení programu



CYCLONE

Software-No.: MKC 5.8

Date: 18.06.20

Time: 08:21:15

Exit

1st Slurry Dipping Time

2nd Slurry Dipping Time

Number of draining swivels

Draining Time Bottom

Draining Time Top

Wax Tree sanding horizontal

Number of sanding swivels

Waiting Time bottom position

Waiting Time top position

Number of draining swivels

Primary

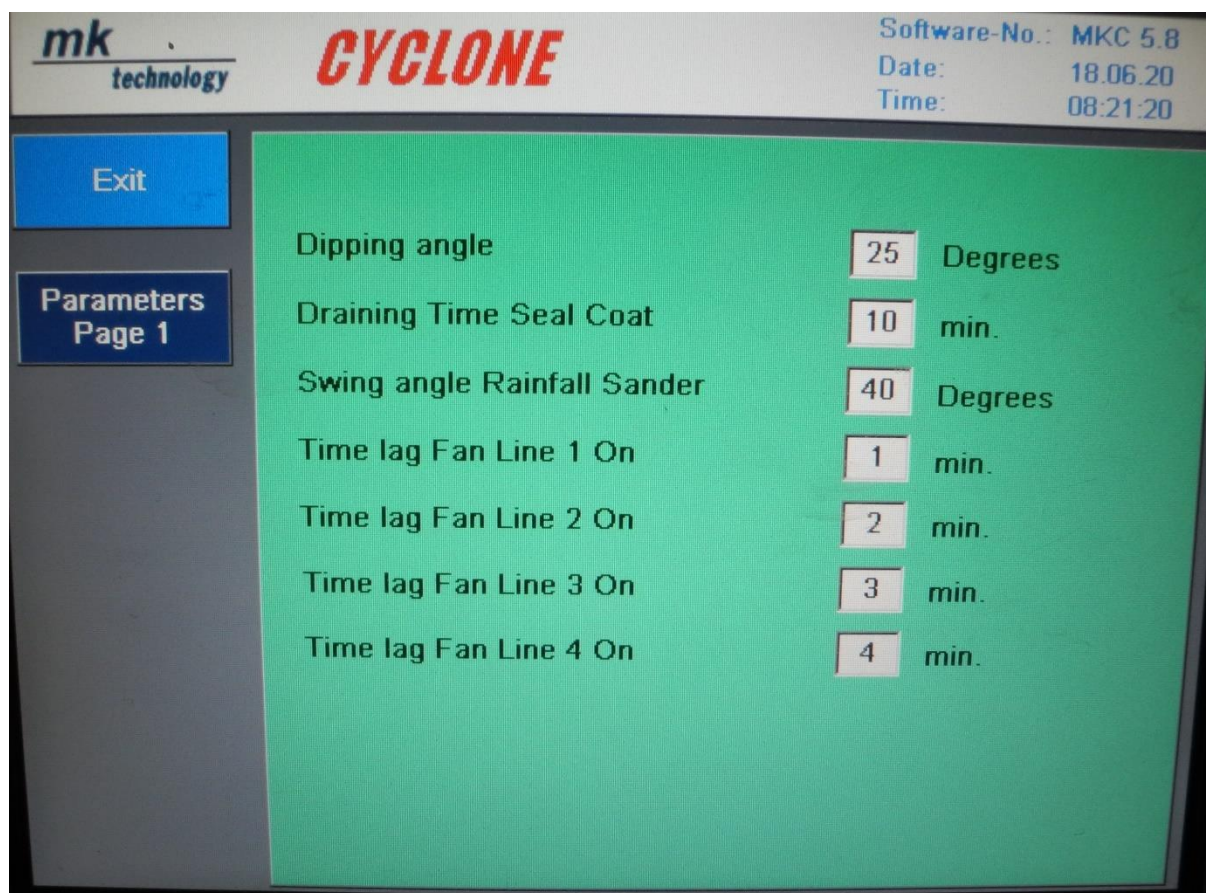
Back Up

20 sec.	45 sec.
0 sec.	0 sec.
5	2
5 sec.	7 sec.
5 sec.	7 sec.
5 sec.	5 sec.
3	3
5 sec.	5 sec.
5 sec.	5 sec.
4	4

Parameters Page 2

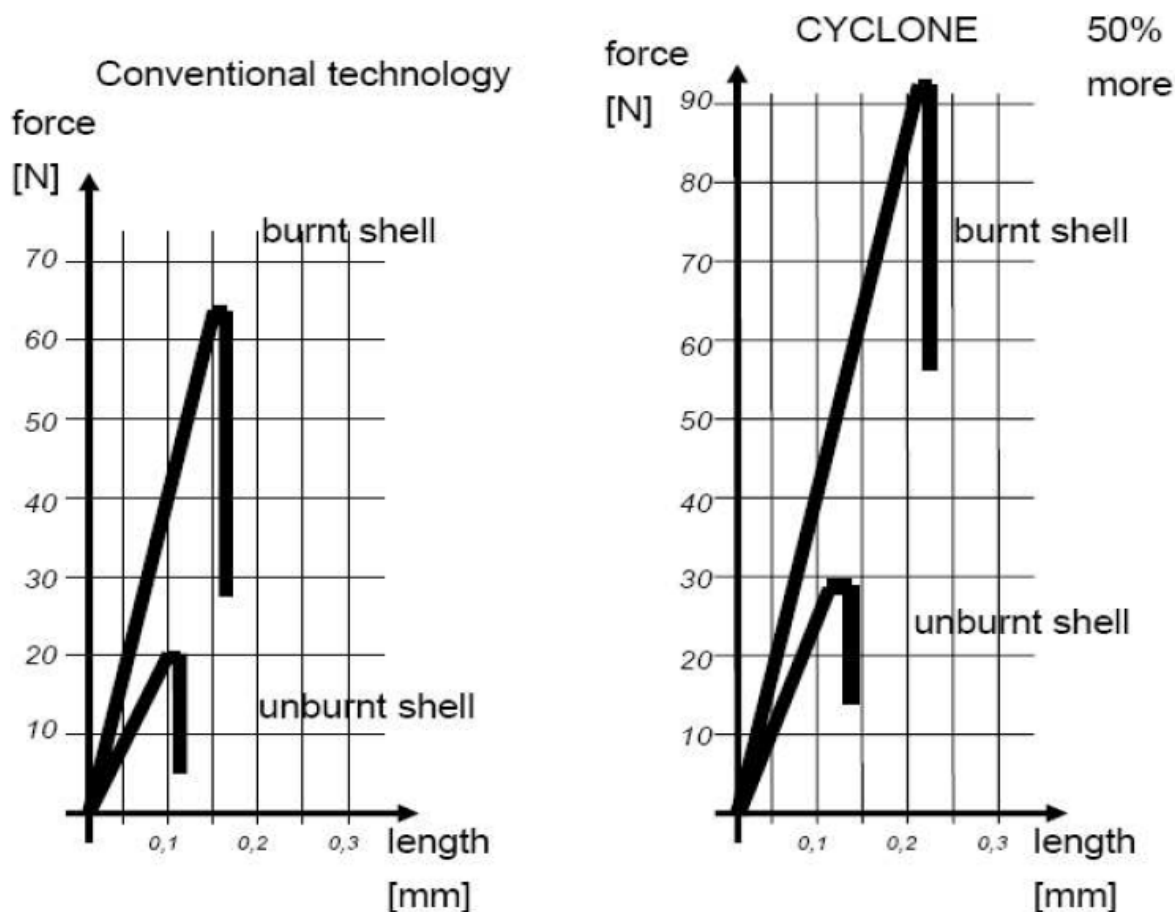
Obr. 17 První polovina nastavitelných parametrů programu

22



Obr. 18 Druhá polovina nastavitelných parametrů programu

Zařízení Cyclone umožňuje namáčení, posyp i sušení skořepin. Namáčení a posyp v tomto zařízení nejsou příliš odlišné od běžného postupu ať už ručního, robotického nebo mechanizovaného. Hlavní výhodou tohoto zařízení je schopnost rapidního sušení v sušící komoře. Michael Kügelgen z MK Technology popisuje v článku [2] funkci zařízení. Rychlost sušení má být dosažena pomocí větráků, které produkují v komoře extrémně turbulentní proud vzduchu [2]. Pokles teploty vlivem odpařování vody je kompenzován infračervenými zářiči, které brání fluktuaci teploty [2]. Systém disponuje klimatizací, která zabraňuje přehřívání a reguluje teplotu v rozmezí +/- 1° [2]. Vlhkost proudu vzduchu je udržována pomocí odvlhčovače, který má snížit vlhkost až k 10-15 % [2]. Systém je regulován PLC automatem, který sbírá data ze senzorů monitorujících teplotu v komoře, teplotu skořepiny a vlhkost v komoře [2]. V článku je dále uvedeno, že skořepiny rychle sušené v zařízení Cyclone by měly disponovat vyšší pevností než skořepiny vyrobené konvenční technologií (viz obr. 19) [2].



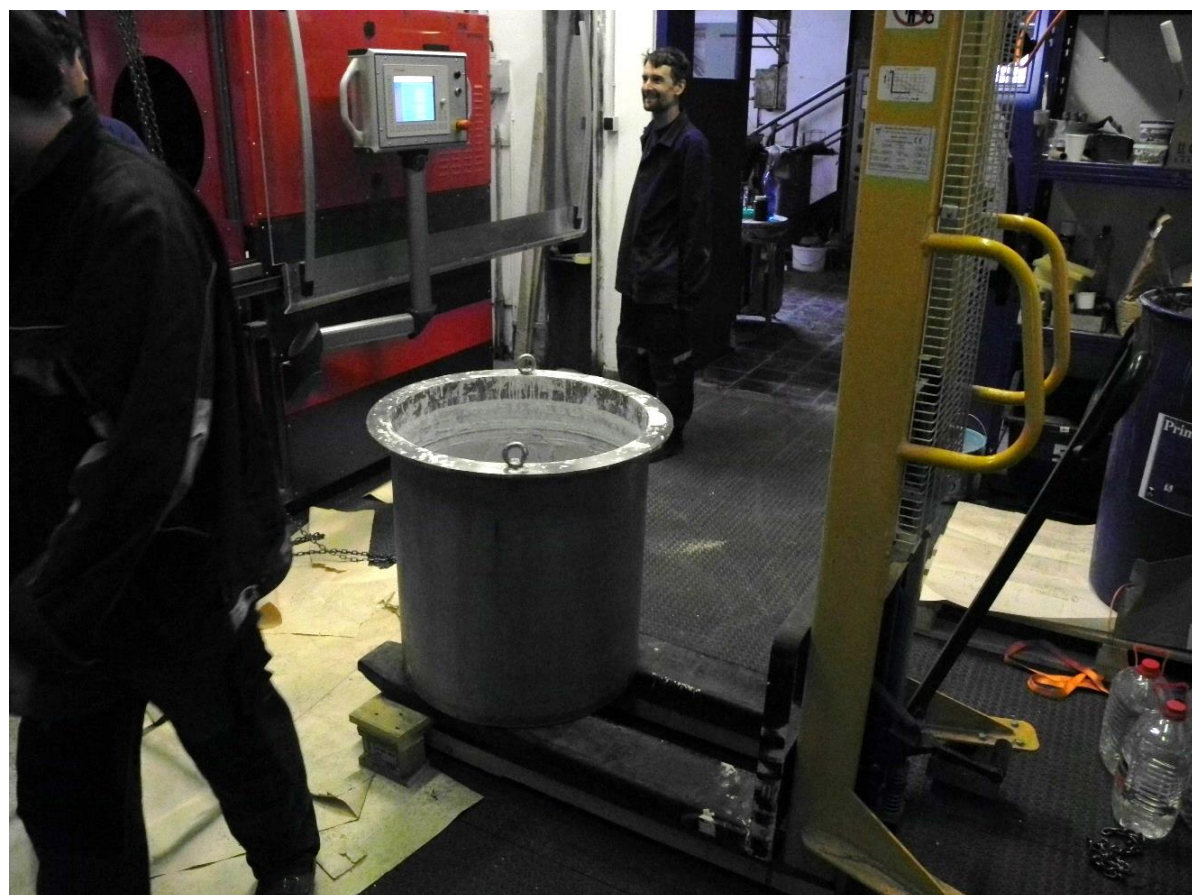
Obr. 19 Srovnání pevností skořepin sušených konvenčně a sušených na Cyclone [2].

2.1 Nádrže na břečku

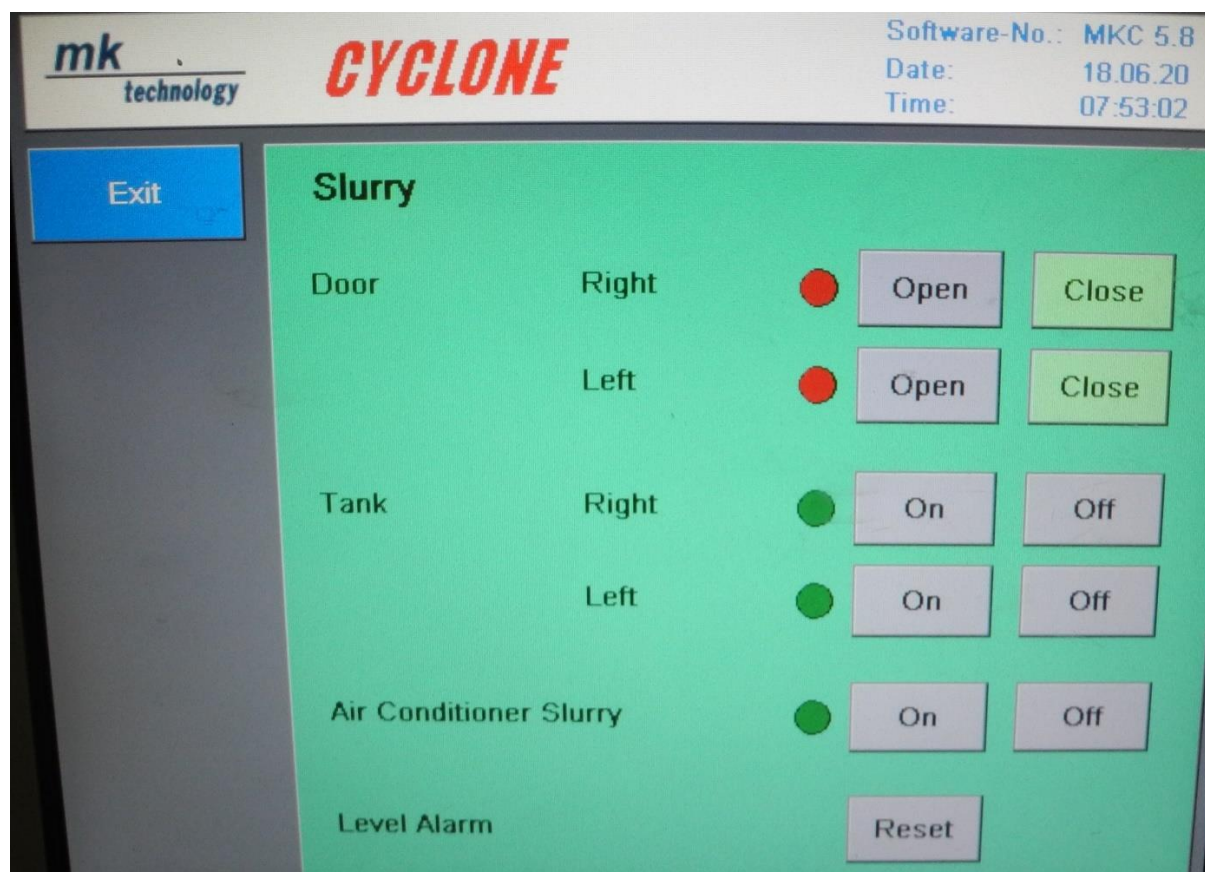
Nádrže na břečku (viz obr. 20 a 21) jsou neustále míchány a klimatizovány na požadovanou teplotu. Míchání probíhá lopatkou kopírující stěnu nádrže a dno nádrže, zatímco nádrže s břečkou rotují. Pokud nejsou používány, jsou zakryty plechovými kryty, které oddělují jednotlivé nádrže od okolní atmosféry. Jednotlivé kryty mají vlastní pneumatický pohon, avšak obě nádrže nemohou být otevřeny najednou z důvodu prostorové dispozice. Nádrže lze otevřít v manuálním režimu (viz obr. 22) pro kontrolu břečky, odběr vzorků či ruční namáčení tvarů, které vyžadují při namáčení zásah operátora.



Obr. 21 Nádrž na břechy otevřená během okapávání



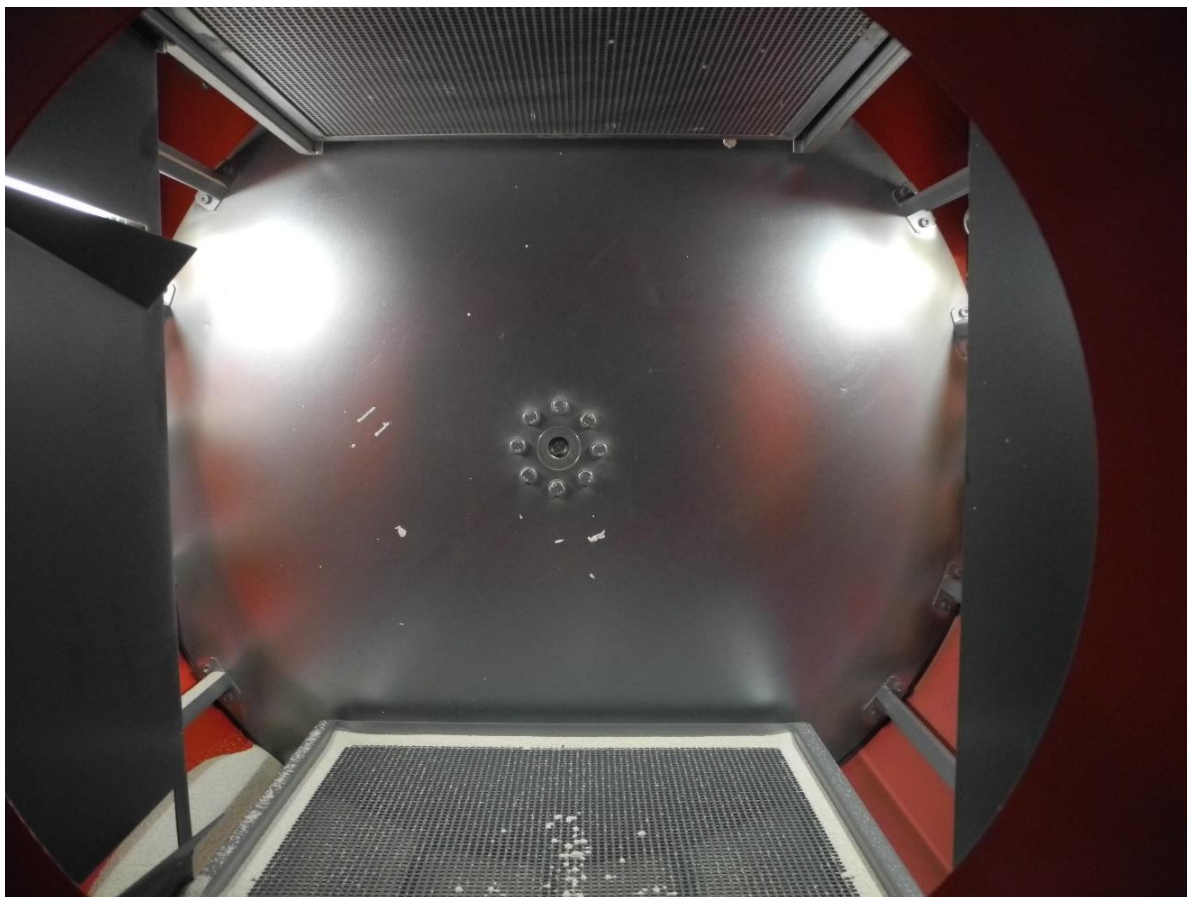
Obr. 22 Nádrž na břechy vyjmutá ze stroje během údržby



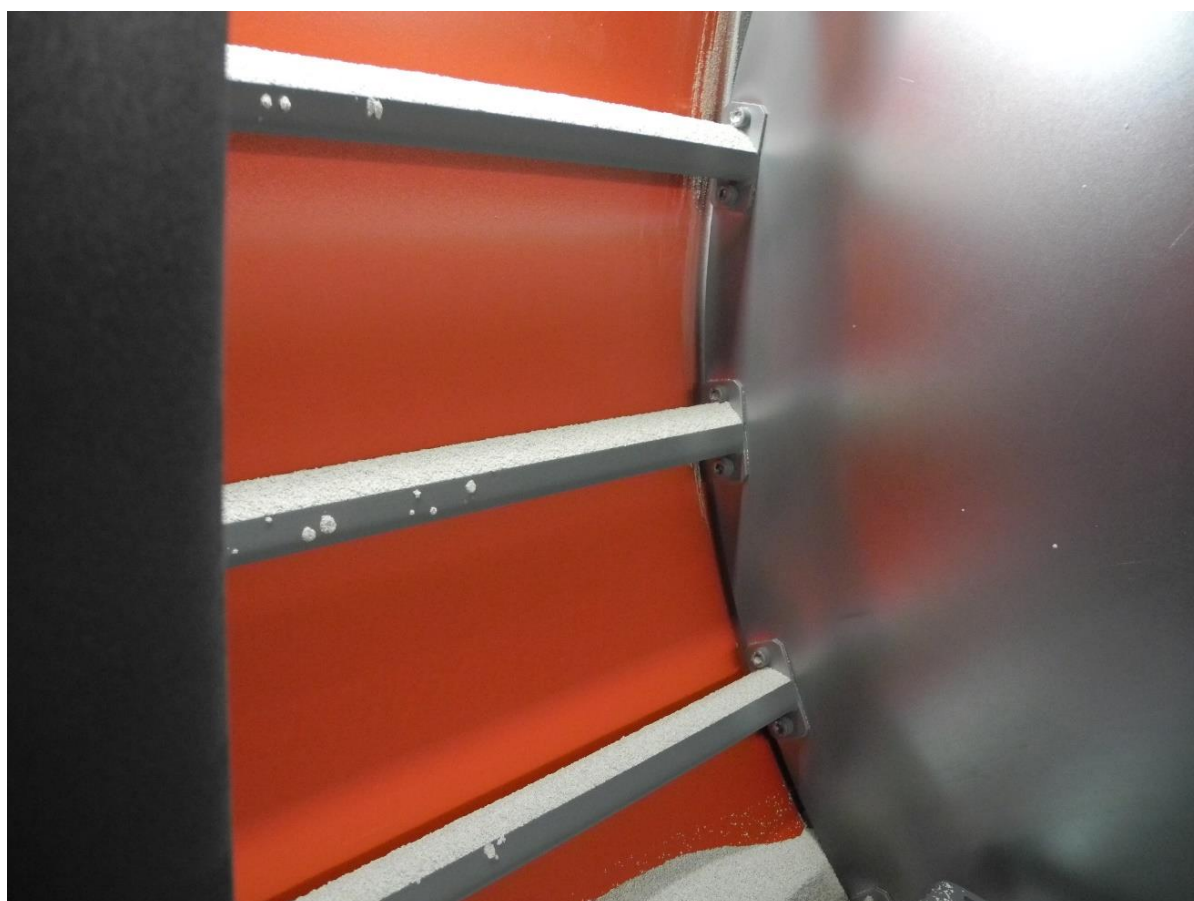
Obr. 23 Manuální ovládání nádrží na břechku

2.2 Sprchový posyp

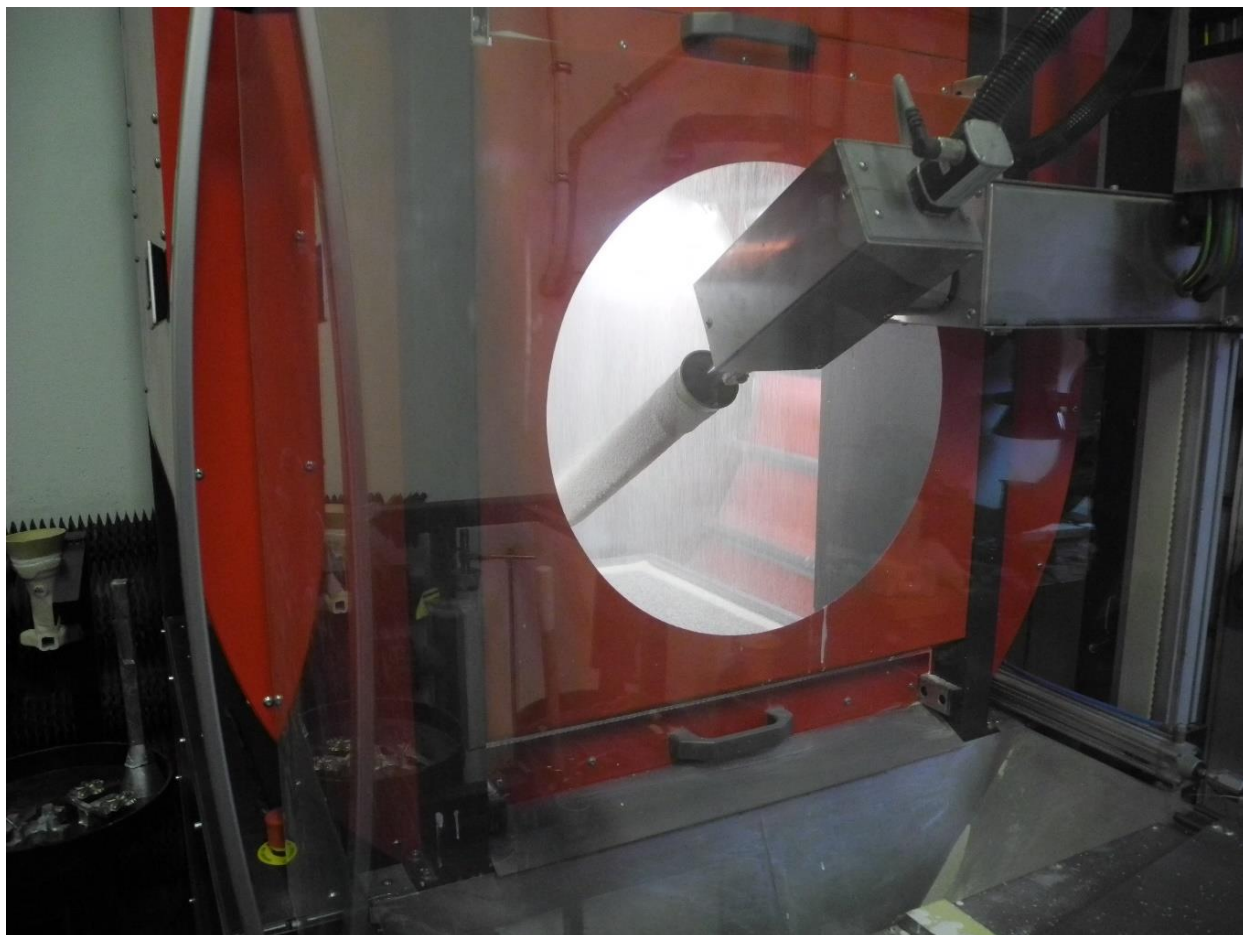
V komoře sprchového posypu (viz obr. 24) je umístěna rotační klec tvořená lamelami tvaru U (viz obr. 25), které jsou umístěny otevřením tangenciálně po směru otáčení. Klec při otáčení nabírá do lamel posyp a v horní části komory se posyp vysypává do horní části zařízení, kde propadává do komory a dopadá na vložený stromeček (viz obr. 26). V horní i dolní části zařízení jsou síta, na nichž se zachycují případné odloupené kusy břechky. Komoru sprchového posypu lze také ovládat manuálně (viz obr. 27).



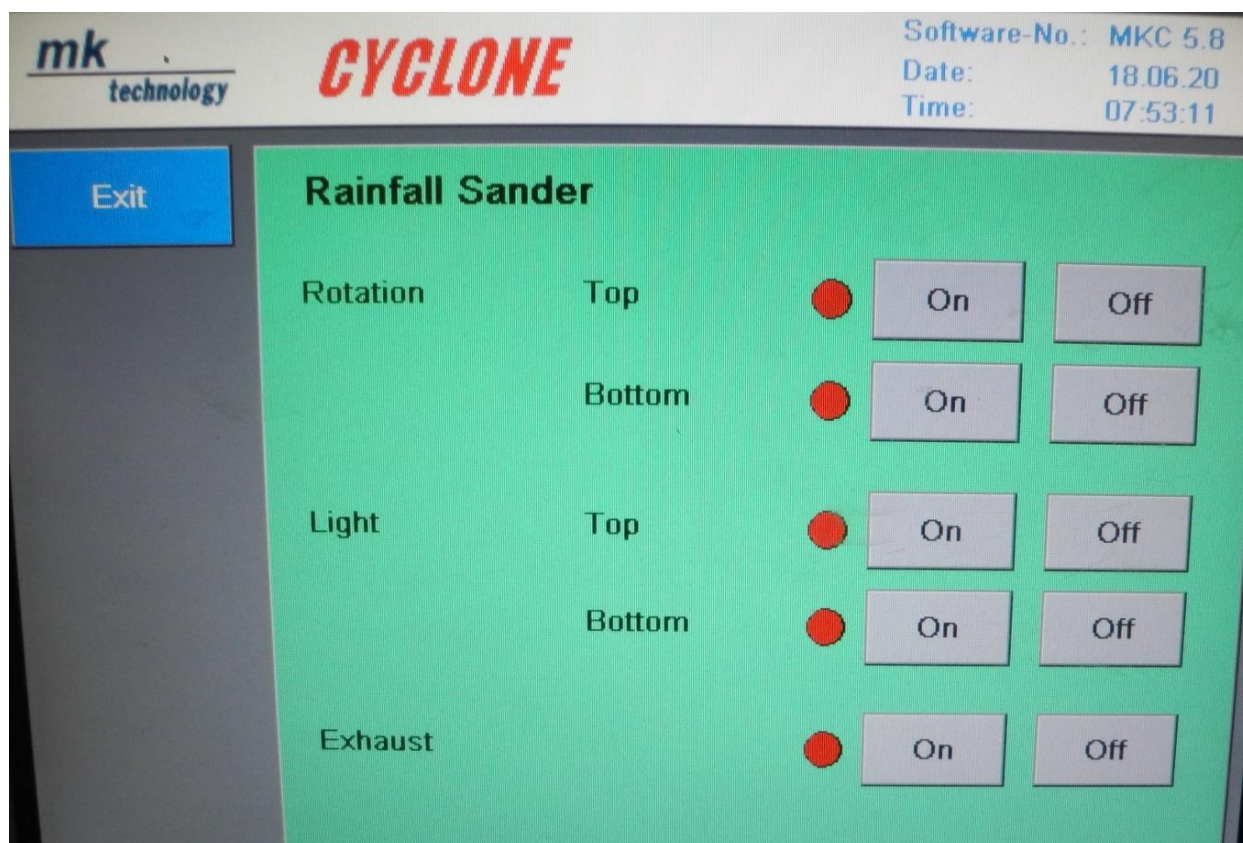
Obr. 24 Komora sprchového posypu



Obr. 25 Lamely plné posypového ostríva



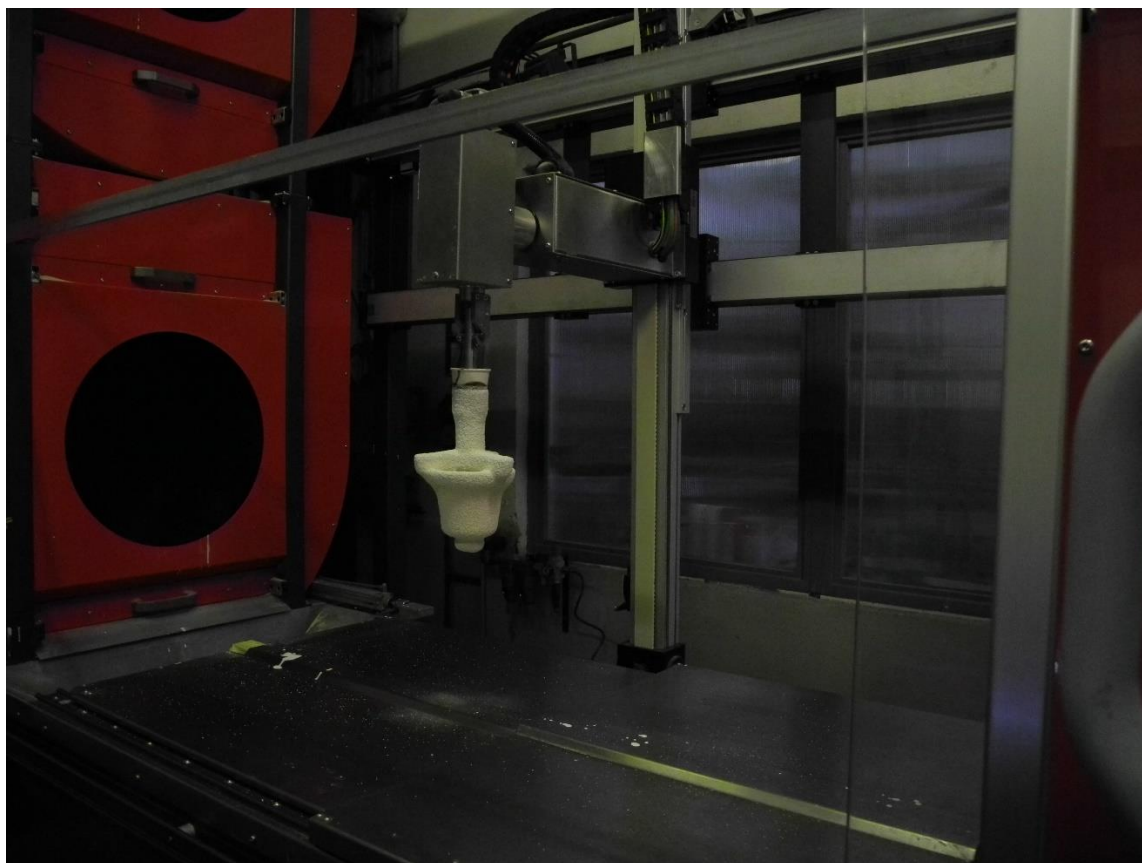
Obr. 26 Komora posypu v provozu



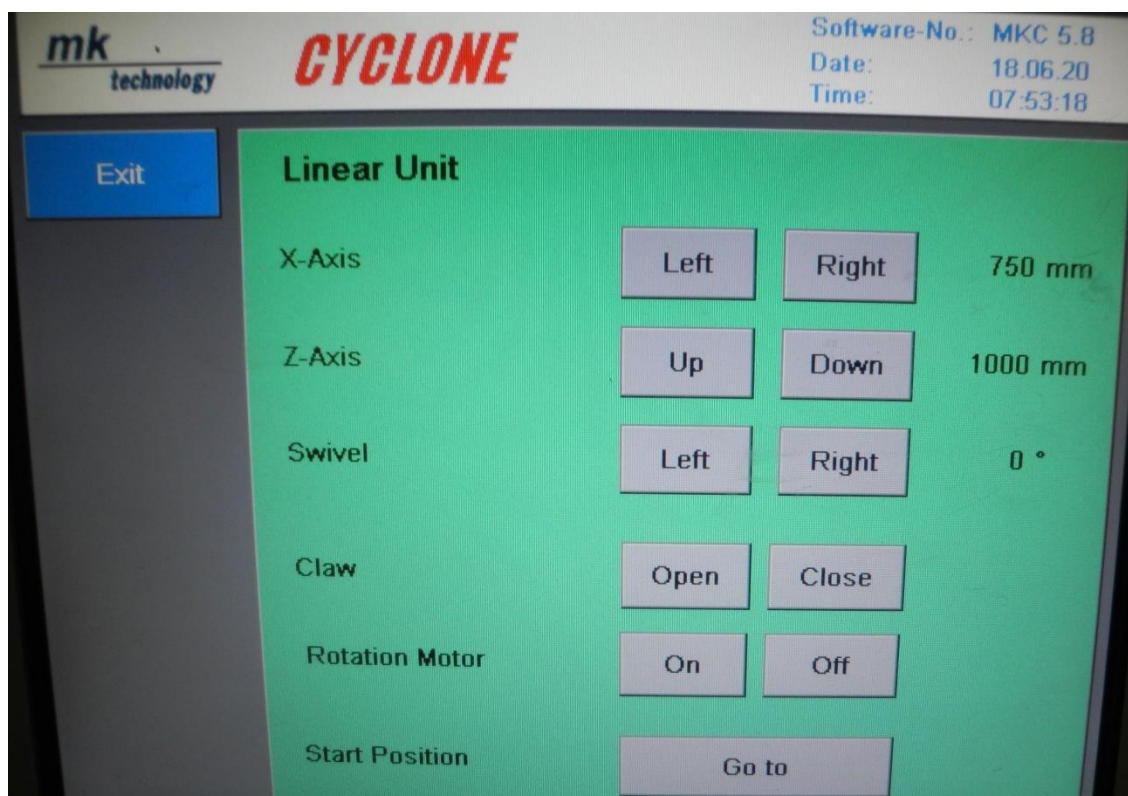
Obr. 27 Manuální ovládání sprchového posypu

2.3 Pohonná jednotka

Pohonná jednotka (viz obr. 28) operuje ve dvou osách lineárního pohybu a dvou osách rotace. Krajiní polohy jsou omezeny koncovými spínači. Na jejím konci se nachází čelist, do níž jsou upínány tyče zalité do stromečků. Čelist je aretována kolíkem, který zajíždí do vybrání v upínacím trnu, čímž brání pohybu trnu v čelisti, či jeho vysunutí z ní. Celá pohonná jednotka může být ovládána manuálně operátorem (viz obr. 29).



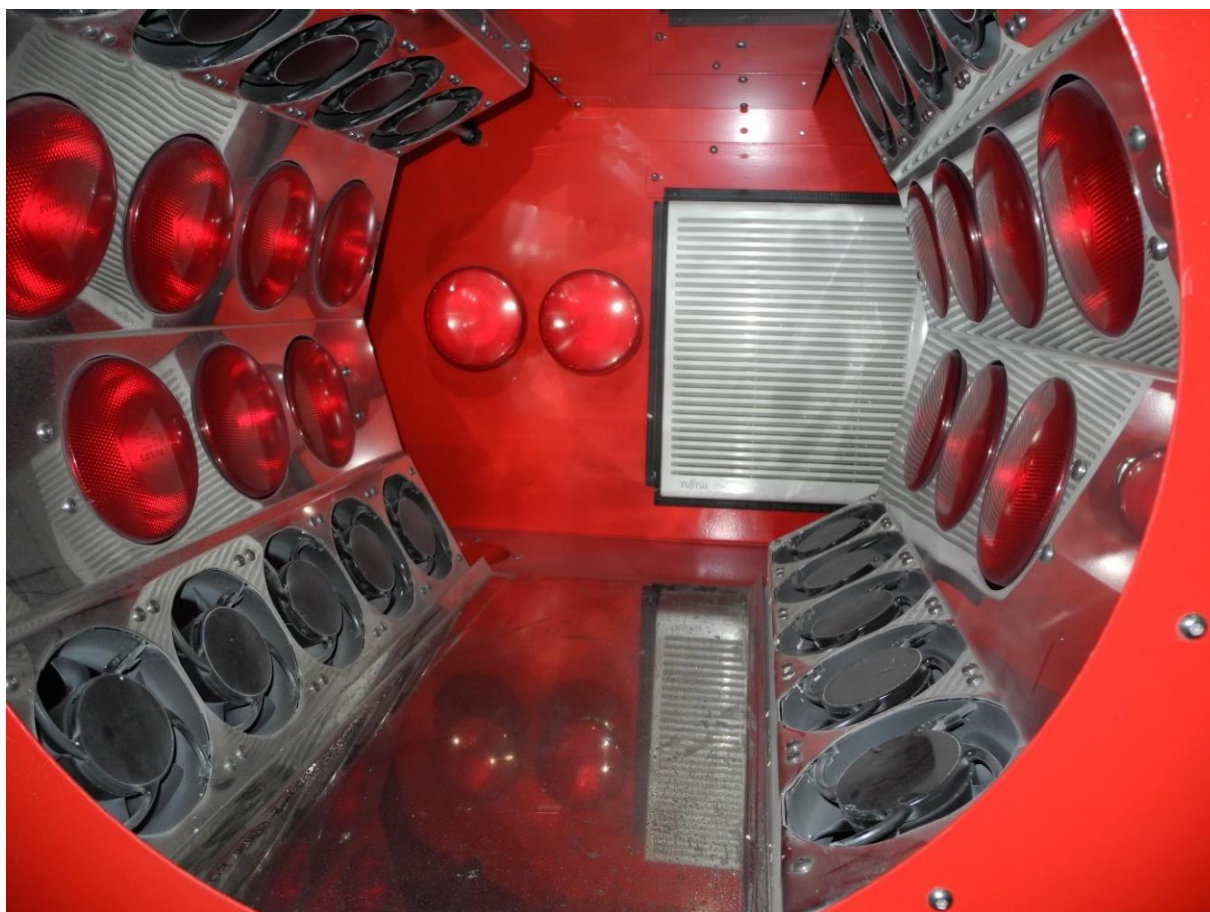
Obr. 28 Pohonná jednotka po dokončení programu s upnutou hotovou skořepinou



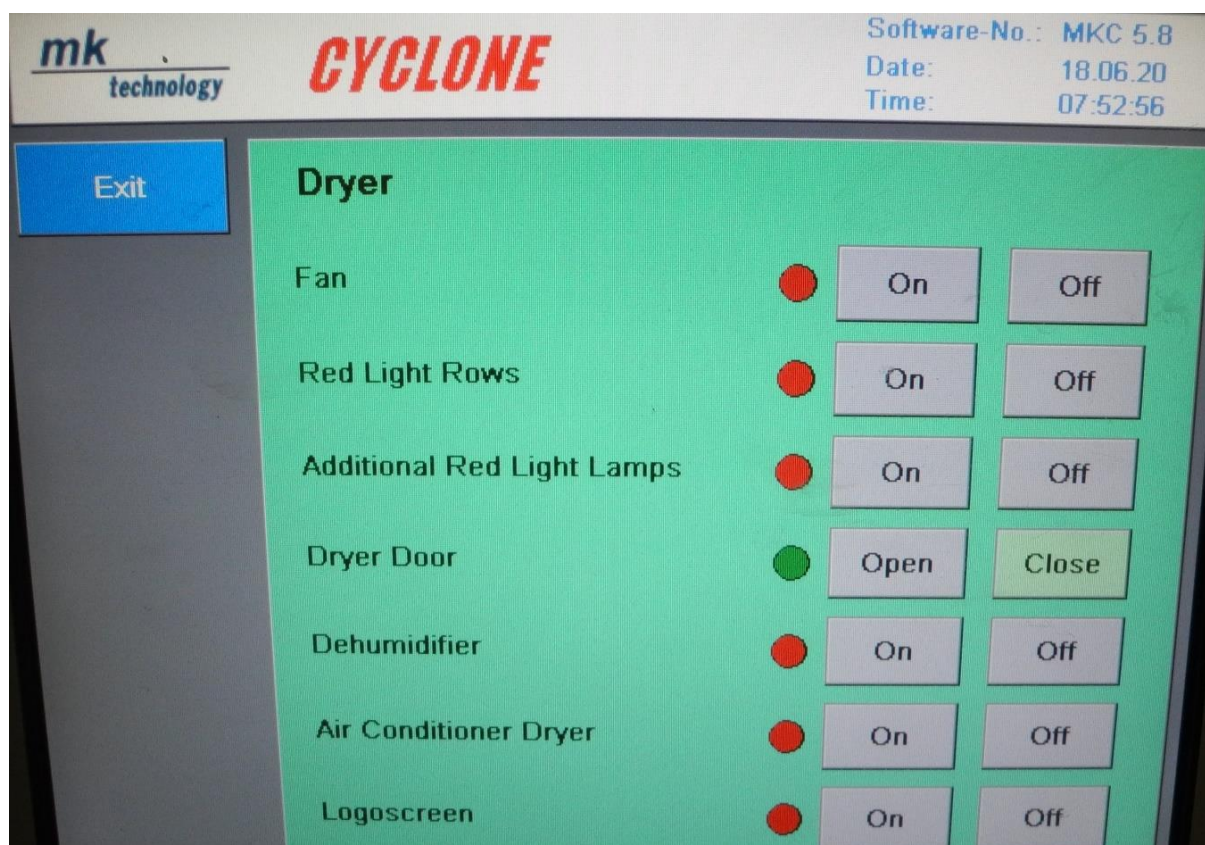
Obr. 29 Manuální režim ovládání pohonné jednotky

2.4 Sušící komora

Sušící komora (viz obr. 30) má pneumaticky ovládané dveře s průzorem. Uvnitř se po obvodu nacházejí řady infračervených zářičů oddělované řadami větráků. Komora je vybavena klimatizací a odvlhčovačem. Stromečky umístěné v sušící komoře jsou otáčeny, aby bylo dosaženo rovnoměrného sušení [2]. Prvky sušící komory lze ovládat v manuálním režimu (viz obr. 31). Nastavení teploty a vlhkosti během manuálního režimu je importováno z programu, který je aktuálně aktivní.



Obr. 30 Sušící komora s otevřenými dveřmi



Obr. 31 Manuální ovládání sušící komory

3 SLEDOVANÉ PARAMETRY SKOŘEPIN A JEJICH MĚŘENÍ

3.1 Pevnost v ohybu

Pevnost v ohybu je kvantitativní veličina charakterizující pevnost skořepiny. Bohužel obalované skořepiny nejsou homogenní izotropní tělesa, což značně komplikuje zkoušky mechanických vlastností. Skořepiny jsou kompozitem posypu, moučky křemičité keramiky, resp. gelu kyseliny křemičité v syrovém stavu. Dále struktura obsahuje póry vzniklé kontrakcí při sušení. Díky těmto pórům má skořepina prodyšnost. Další vlastností, kterou tyto póry přináší, je nízká vrubová citlivost. Práce [13] ve svém experimentu (viz obr. 32) ukazuje, že lomové napětí ve třibodovém ohybu zůstává neovlivněno nehledě na přítomnost vrubu na povrchu.

Case	Length, mm	Width, mm	Thickness, mm	Notch	Experimental flexural failure stress, MPa	FEM calculated flexural failure stress, MPa
1	76.2	29.0	7.1	Yes	3.7	11.3
2				No	3.7	3.2

Obr. 32 Výsledky experimentu se vzorkem s a bez vrubu [13]

Práce [13] uvádí, že póry ve struktuře působí jako výrazný koncentrátor napětí, a proto není výsledná pevnost ovlivněna vnějšími vruby. Tato vlastnost částečně usnadňuje přípravu vzorků, neboť lze zanedbat drobné nerovnosti v povrchu způsobené řezáním či broušením.

Stav vzorků by měl reprezentovat daný proces v dané slévárně, případně i konkrétní defekty k nimž dochází. Procesem vytavování vosku v autoklávu dochází k nárůstu pevnosti vzorku, jak ukazuje práce [14]. O něco menší nárůst je pozorován u vzorků skořepin umístěných do autoklávu bez přítomnosti vosku [14]. Naopak proces vytavování vosku vroucí vodou skořepinu velmi významně oslabuje za vlhka a snižuje pevnost vzorků i po následném sušení [14].

Pevnost skořepin, jakožto keramického materiálu, se nejčastěji hodnotí zkouškou pevnosti v ohybu. Nejčastěji se používají zkoušky podle normy ČSN EN 843-1, ačkoliv tato norma předpokládá monolitickou keramiku, homogenní a izotropní materiál. Norma předepisuje různé úpravy zkušebních těles, avšak pro testování skořepin je vhodná kategorie IV: dohodnutý postup, neboť zkoušet vzorky skořepin, jejichž vnější strana je hrubá, ve stavu řezaného, broušeného či leštěného povrchu by nebylo reprezentativní pro technickou praxi.

3.1.1 Tříbodový ohyb

Zkouška tříbodovým ohybem (viz obr. 33) vyvolává maximální napětí v jednom bodě pod zatěžujícím válečkem, které je rovno:

$$\sigma_f = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (1) [15]$$

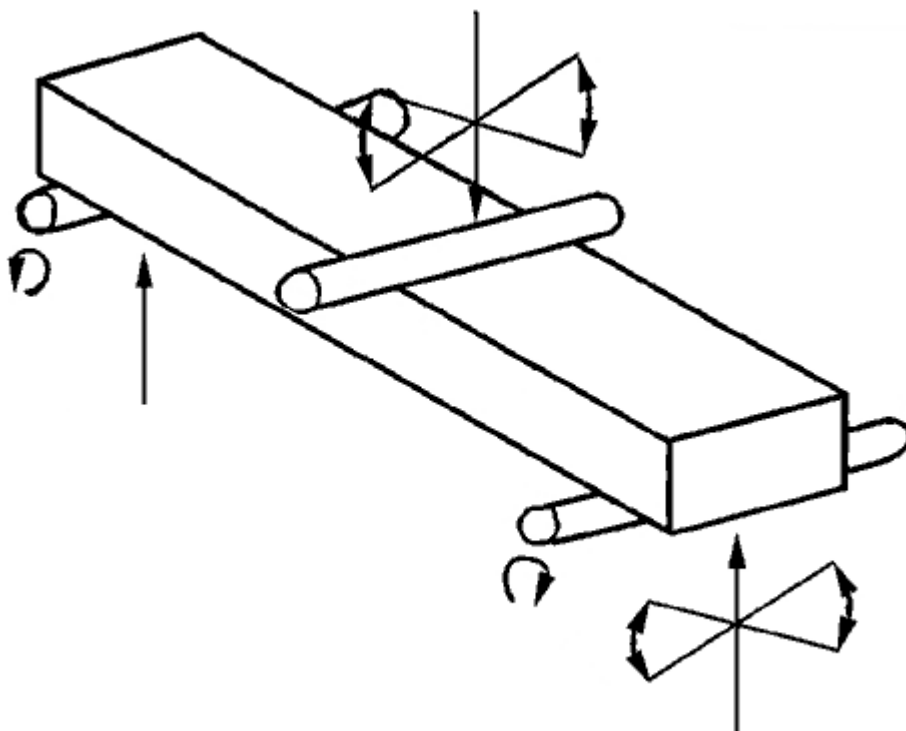
σ_f – lomové napětí [MPa]

F – špičková síla při lomu [N]

b – šířka zkušebního tělesa [mm]

h – tloušťka zkušebního tělesa [mm]

l – vzdálenost mezi středy podpěrných válečků [mm]



Obr. 33 Tříbodový ohyb [16]

Z toho je patrné, že pro případ skořepiny není tříbodový ohyb vhodný vzhledem k její heterogenní povaze, neboť by konkrétní umístění vzorku pod zatěžující váleček mohlo ovlivnit výslednou naměřenou pevnost.

3.1.2 Čtyřbodový ohyb

Zkouška čtyřbodovým ohybem (viz obr. 34) vyvolává maximální napětí v celé oblasti mezi zatěžujícími válečky, které je rovno:

$$\sigma_f = \frac{3Fd}{bh^2} \quad (2) [15]$$

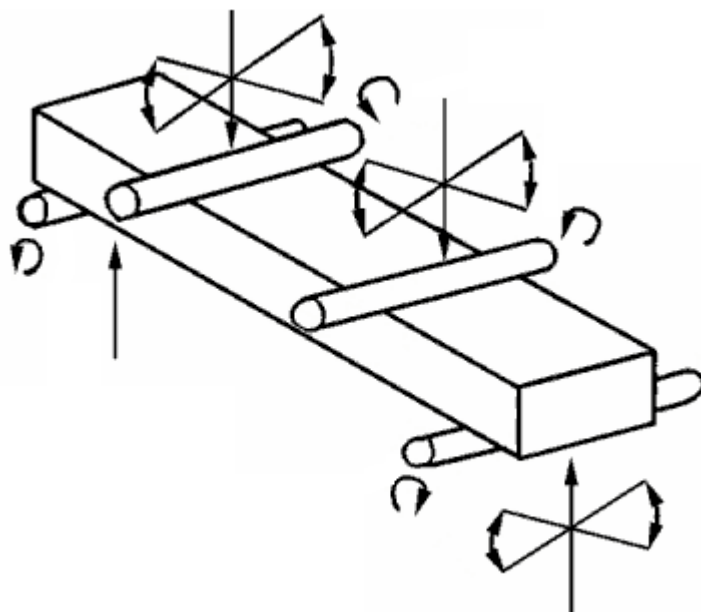
σ_f – lomové napětí [MPa]

F – špičková síla při lomu [N]

b – šířka zkušebního tělesa [mm]

h – tloušťka zkušebního tělesa [mm]

d – průměrná vzdálenost mezi středy podpěrných a zatěžujících válečků [mm]

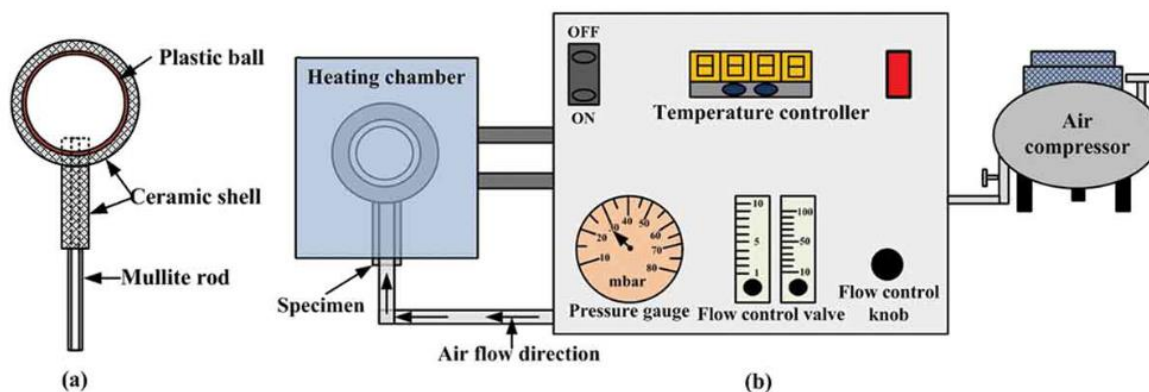


Obr. 34 Čtyřbodový ohyb [16]

Je patrné, že větší oblast zatížená maximálním napětím minimalizuje chybu vnesenou umístěním vzorku mezi podpory.

3.2 Prodyšnost

Prodyšnost skořepiny je důležitá kvůli odvodu vzduchu a dalších plynů během procesu lití [17]. Tato vlastnost se projeví obzvláště u tvarově komplikovanějších odlitků, kde během plnění vznikají kapsy plynů odříznuté taveninou od vtokové soustavy. S tloušťkou skořepiny se prodyšnost snižuje a zvyšuje se riziko vad spojených s plynem [18]. Měření prodyšnosti probíhá za vysokých teplot pomocí aparatury (viz obr. 35), která zaznamenává průtok vzduchu skrz vzorek skořepiny a rozdíl tlaků [18]. Z rozdílu tlaků je počítána prodyšnost podle rovnice (3).



Obr. 35 Aparatura pro měření prodyšnosti skořepin za vysokých teplot [18]

$$k = \frac{\mu (r_o - r_i)}{s \cdot 4\pi r_o r_i} \quad (3) [17]$$

k – prodyšnost za tepla [m^2]

μ – dynamická viskozita proudícího média [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$]

s – směrnice regresní přímky závislosti rozdílu tlaků na průtoku [mm]

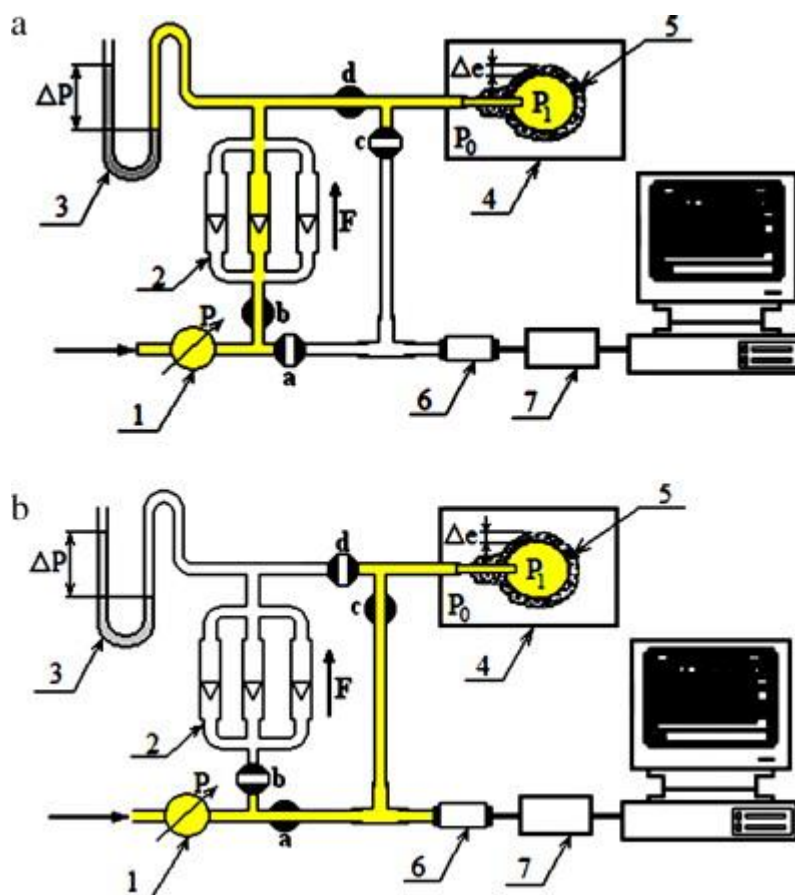
r_o – vnější poloměr zkušebního tělesa [m]

r_i – vnitřní poloměr zkušebního tělesa [m]

Vzorky bývají zpravidla skořepiny kulového tvaru připojené na trubici z žáruvzdorného materiálu. Modelem pro takovéto vzorky obvykle bývá pingpongový míček či dutá vosková koule [17] [18].

3.3 Kombinovaná zkouška

Práce S. Amira, D. Dubé a R. Temberlay [17] ukazuje možnost použití upravené aparatury (viz obr. 36) pro testování prodyšnosti i pevnosti.



Obr. 36 Aparatura nastavitelná pro testování prodyšnosti (a) i pevnosti (b) za tepla [17]

Narozdíl od zkoušek popsaných v 3.1 tato metoda porušuje vzorky skrz obvodové nikoliv ohybové napětí. Prakticky se jedná o destruktivní tlakovou zkoušku, během níž je zaznamenáván průběh tlaku, z něhož je počítáno napětí (4). Takové hodnocení pevnosti je reprezentativnější vzhledem ke skutečnému způsobu namáhání skořepin, reprezentuje větší množství materiálu a také je více citlivé na defekty ve skořepině než zkouška pevnosti v ohybu [17]. Výhodou je také snadná příprava vzorků oproti požadavkům na vzorky pro zkoušku pevnosti v ohybu [17]. Hlavní výhodou této

metody je ovšem hodnocení pevnosti za tepla, což by vyžadovalo nákladné a komplikované vybavení, pokud by bylo prováděno zkoušením pevnosti v ohybu [17]. Komplikací této metody je ovšem bezpečnost [17]. Prakticky se jedná o explozi tlakové nádoby při vysokém tlaku. Je nutné chránit personál i vybavení před fragmenty, které vzniknou porušením souvislosti vzorku. Práce [17] uvádí nutnost chránit topná tělesa keramickým štítem, překrýt vstupní otvor pece drátěnou mřížkou a použít odsávání vzniklého prachu.

$$\sigma = \frac{p_b r_i}{2t} \quad (4) [17]$$

σ – lomové napětí [MPa]

p_b – špička tlaku při porušení [MPa]

r_i – vnitřní poloměr zkušebního tělesa [m]

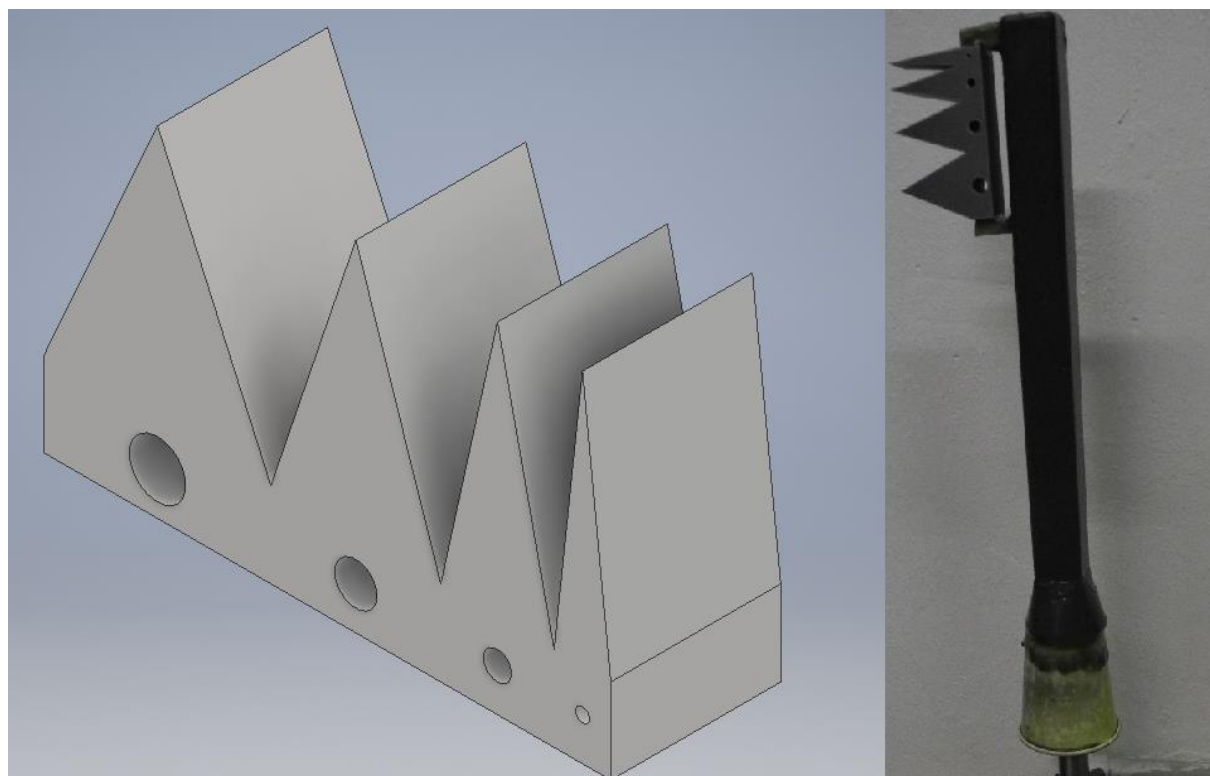
t – tloušťka stěny zkušebního tělesa [m]

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem experimentů je získat lepší představu o průběhu procesu rychlého sušení a vlivech na ně působících, prozkoumat vliv teploty a vlhkosti na proces rychlého sušení a ověřit tvrzení z článku [2] o vyšší pevnosti rychle sušených skořepin v porovnání s konvenčně sušenými skořepinami.

4.1 Zkušební tělesa

Vzorky byly tvořeny vtokovým kulem, na který bylo nalepeno zkušební těleso vlastní návrhu (viz obr. 37) vyrobené z PLA filamentu pomocí 3D tisku, jehož geometrie byla vytvořena za účelem odhalení nedokonalostí obalování a sušení. Bylo předpokládáno, že v případě nedostatečného nebo příliš rychlého sušení by mohlo dojít k porušení souvislosti, nebo dokonce odlomení obalu na ostrých hranách či v dutinách průchozích děr. V tupých úhlech mezi hranami bylo naopak předpokládáno pozorování bublin a nedokonalého obalení vzorku. Jediným pozorovaným defektem byly bubliny, ostatní předpokládané defekty bylo možné pozorovat až po rozříznutí vytavené skořepiny kolmo k osám děr skrz jejich střed. Tyto vzorky jsou použity pro experimenty 4.3, 4.4 a 4.6.



Obr. 37 Zkušební těleso (vlevo) a celý vzorek (vpravo)

4.2 Použité materiály

Skořepiny v těchto experimentech použité jsou vyráběny z břechky, která je složena z pojiva Primecote® a plniva Ranco-Sil™ 4 se zrnitostí 200 mesh. Primární břecha má obsah pevných částí 65 % a sekundární obsahuje 62 %. Z toho vychází receptura sekundární břechky 38 kg pojiva a 62 kg plniva na 100 l. Primární posyp je zirkonové ostřívo o zrnitosti 0,1 až 0,3 mm. Sekundární posyp používá ostřívo Molochite™ o zrnitosti 0,5 až 1,0 mm.

4.3 Vliv prvků sušící komory

První sada experimentů měla za úkol odhalit vliv jednotlivých funkcí na průběh sušení skořepin. V této části experimentu byl sledován přínos ventilátorů a infračervených žárovek. Sušení bylo vyhodnocováno metodou vážení vzorků na digitální váze. Každý vzorek byl zvážen před obalením primárního obalu, které se sestávalo z jedné minuty namáčení, jedné minuty okapávání a jedné minuty posypávání. Poté byl vzorek opět zvážen, upevněn do stroje a bylo zahájeno sušení. Základní interval vážení byl stanoven na tři minuty, avšak v pozdějších fázích sušení, kdy hmotnostní úbytek nebyl dostatečný k tomu, aby byl registrován váhou, byl interval prodlužován na celočíselné násobky původního intervalu za účelem omezení manipulace se vzorkem při zachování dostatečně jemného kroku měření. Vzorky byly sušeny v komoře při zapnuté klimatizaci a odvlhčovači, které byly nastaveny na 25 °C a 15% vlhkost. Nastavení větráků a infračerveného světla bylo měněno podle tab. 1.

Tab. 1 Design experimentu 4.3

	<i>Infračervené světlo</i>	<i>Větráky</i>
Vzorek 1	ne	ne
Vzorek 2	ne	ano
Vzorek 3	ano	ne
Vzorek 4	ano	ano

Kontrolní vzorek byl ponechán na váze ve stejné klimatizované místnosti se zařízením Cyclone za účelem porovnání přínosu zařízení Cyclone na sušení s přínosem atmosféry v místnosti. Kontrast výsledků je patrný z tab. 2. Z naměřených hmotností před a po obalením byla spočítána hmotnost obalu. Vzhledem k rozdílům v hmotnostech jednotlivých vtokových kúlů a drobným odchylkám v jejich velikosti bylo vyhodnocováno procento původní váhy obalu před sušením, které sejevilo jako nejvíce vypovídající faktor minimalizující odchylky vzorků. Byla vyhodnocována ztráta procent hmotnosti obalu za minutu, za účelem porovnávání rychlosti sušení. Dále byl použit vzorec (5) z článku [11] k určení stupně suchosti. Stupeň suchosti umožňuje porovnávat sušení vzorků nehledě na jejich celkovou hmotnost či rozdílnou hmotnost ztracenou sušením. Stupeň suchosti je ovlivněn dosaženou ztrátou hmotnosti, což je nutno brát v potaz. Dále byl také vypočítán přírůstek stupně suchosti za minutu.

$$\eta = \frac{m_p - m_x}{m_p - m_k} \cdot 100 \% \quad (5) [11]$$

m_p – původní hmotnost vzorku [g]

m_x – aktuální hmotnost vzorku [g]

m_k – finální hmotnost vzorku [g]

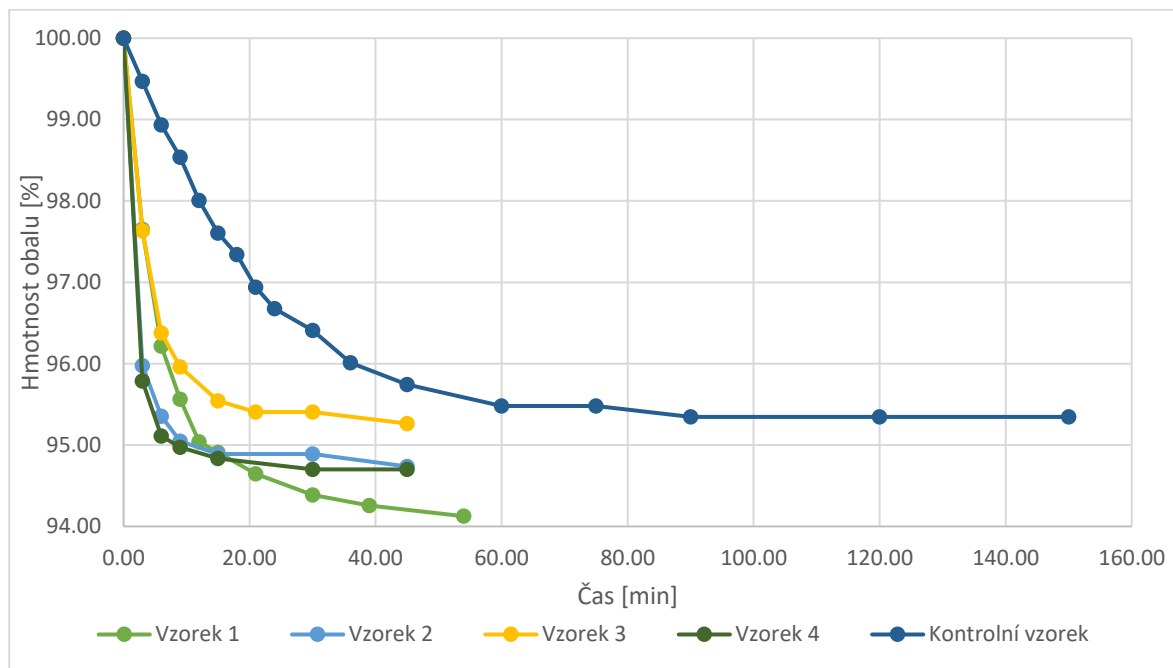
η – stupeň suchosti [%]

Tab. 2 Výsledky experimentu 4.3

Vzorek 1		Vzorek 3		Kontrolní vzorek	
čas min	%hm obalu	čas min	%hm obalu	čas min	%hm obalu
0.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
3.00	97.65	3.00	97.63	3.00	99.47
6.00	96.21	6.00	96.38	6.00	98.94
9.00	95.56	9.00	95.96	9.00	98.54
12.00	95.04	15.00	95.54	12.00	98.01
15.00	94.91	21.00	95.40	15.00	97.61
21.00	94.65	30.00	95.40	18.00	97.34
30.00	94.39	45.00	95.26	21.00	96.94
39.00	94.26			24.00	96.68
54.00	94.13			30.00	96.41

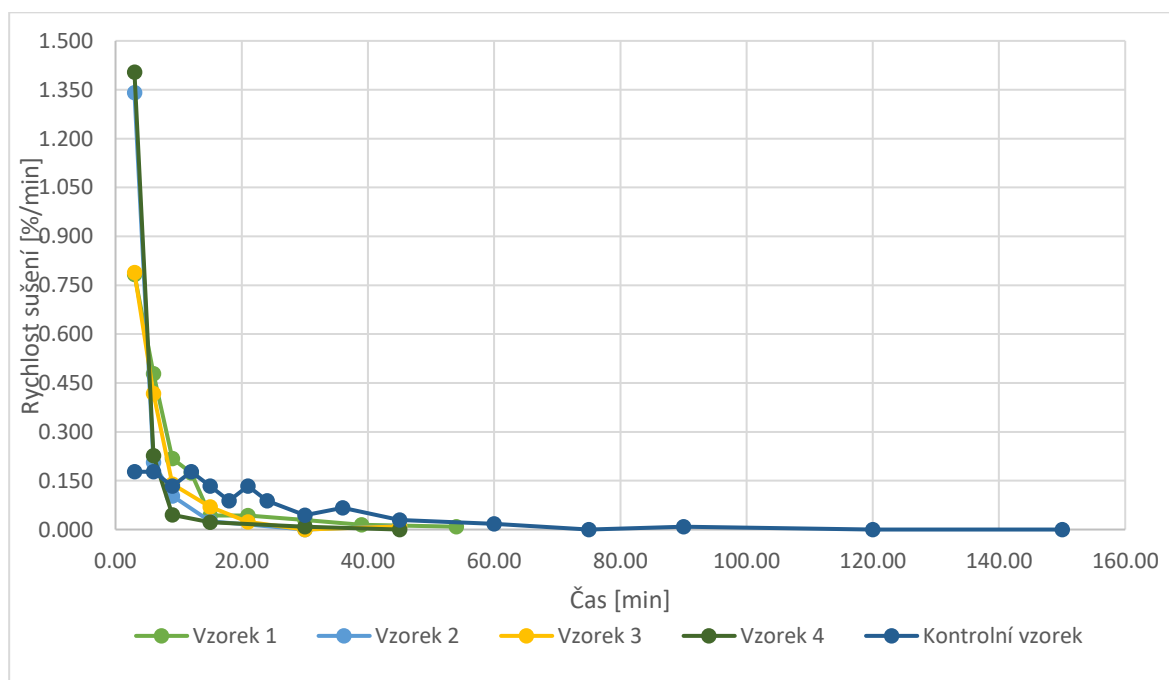
Vzorek 2		Vzorek 4			
čas min	%hm obalu	čas min	%hm obalu		
0.00	100.00	0.00	100.00	36.00	96.01
3.00	95.98	3.00	95.79	45.00	95.74
6.00	95.36	6.00	95.11	60.00	95.48
9.00	95.05	9.00	94.97	75.00	95.48
15.00	94.89	15.00	94.84	90.00	95.35
30.00	94.89	30.00	94.70	120.00	95.35
45.00	94.74	45.00	94.70	150.00	95.35

V obr. 38 jsou zaznamenány průběhy sušení jednotlivých vzorků pomocí vývoje procenta hmotnosti obalu v čase. Vzorky dosahovaly na konci experimentu různých procent hmotnosti obalu, avšak všechny vzorky sušené v zařízení Cyclone dosáhly nižšího procenta hmotnosti obalu než kontrolní vzorek.



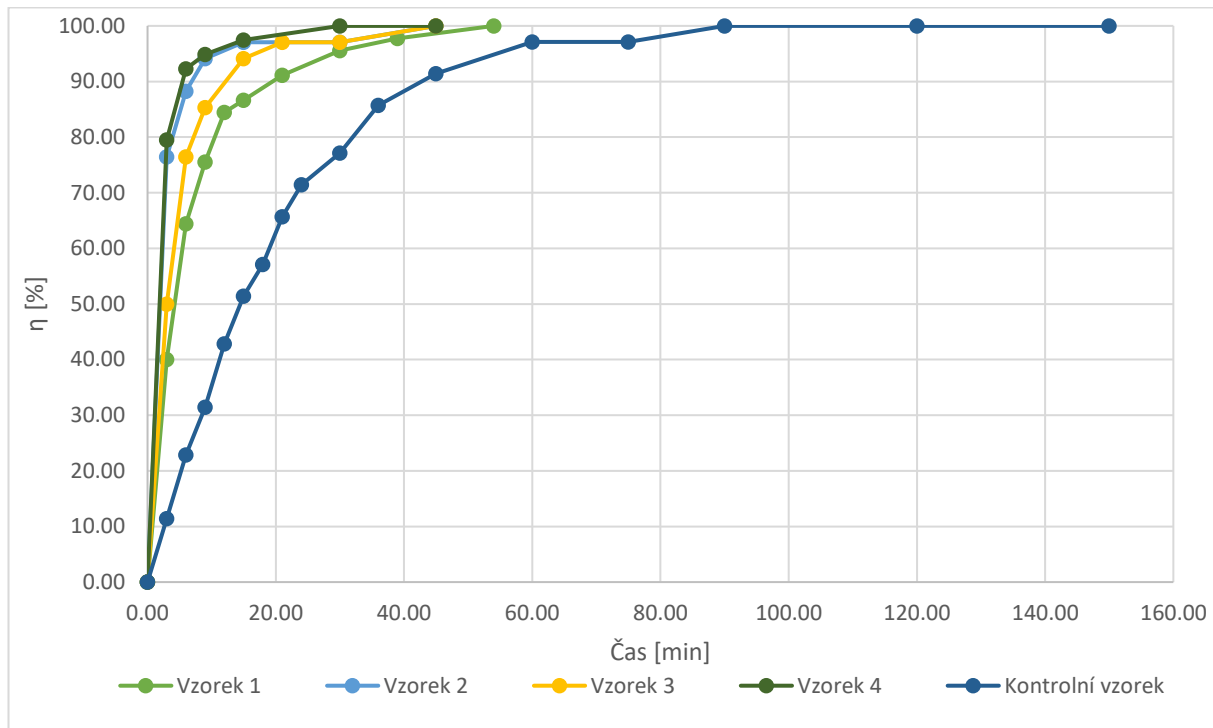
Obr. 38 Graf hmotnosti obalu experimentu 4.3

V obr. 39 je znázorněn úbytek hmotnosti za minutu počítaný pomocí rozdílu hmotnosti a uplynulého času mezi jednotlivými měřeními. Tento graf potvrzuje předpoklad velkého vlivu proudění vzduchu na rychlost sušení, neboť vzorky 2 a 4, které vykazují nejvyšší počáteční rychlost sušení, byly sušeny při zapnutých větrácích. Rychlost sušení vzorku 1 a 3 sušených bez větráků byla jen zanedbatelně rozdílná, z čehož lze vyvodit nízký přínos infrazářičů na rychlost sušení, což je v souladu s tvrzením v článku [2], který uvádí roli infrazářičů jako kompenzace tepelných ztrát vlivem výparu. Lze vidět mnohem pomalejší sušení kontrolního vzorku oproti vzorkům sušeným v sušící komoře. Kolísání rychlosti sušení kontrolního vzorku je způsobeno nedostatečnou citlivostí měření pro takto pomalé sušení.

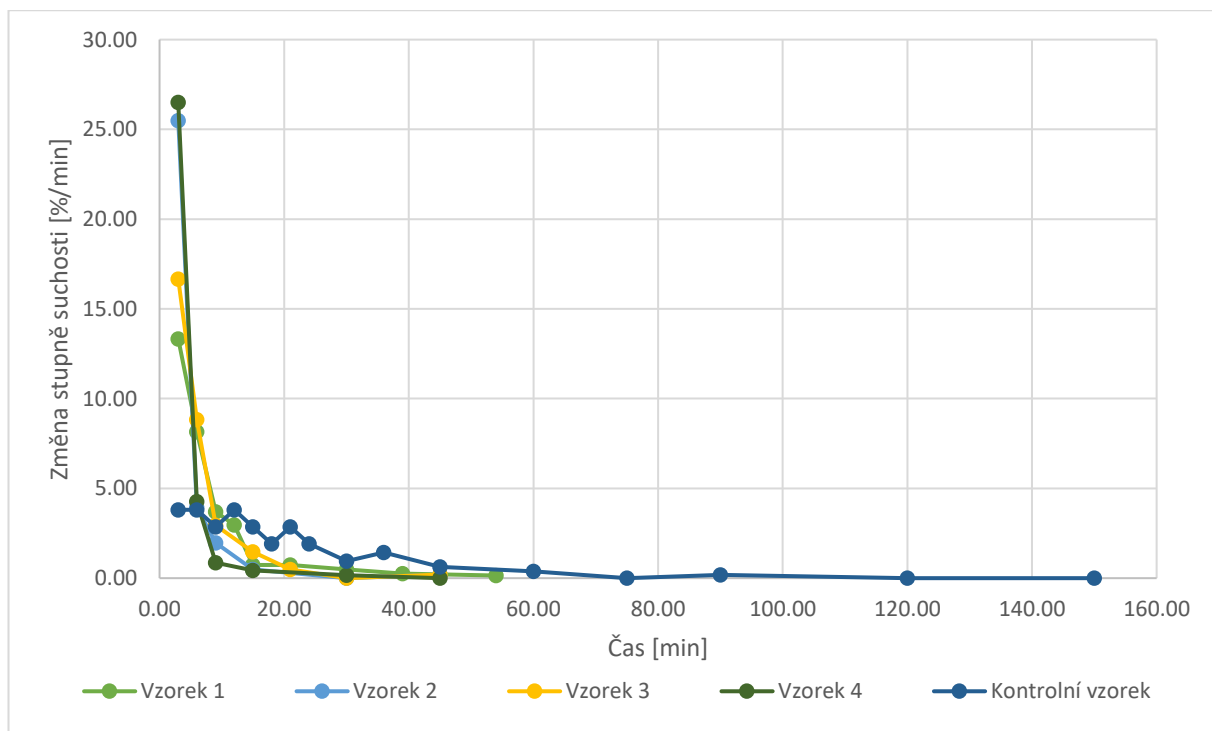


Obr. 39 Graf rychlosti sušení experimentu 4.3

V obr. 40 je znázorněn vývoj stupně suchosti (5) v čase. Tento graf opět ukazuje značně delší čas sušení kontrolního vzorku oproti vzorkům sušeným v Cyclone. V obr. 41 je znázorněna rychlost sušení pomocí změny stupně suchosti za minutu. Kontrolní vzorek opět vykazuje kolísání. Vzorky 2 a 4 opět vykazují velmi podobné změny stupně suchosti.



Obr. 40 Graf stupně suchosti experimentu 4.3



Obr. 41 Graf vývoje stupně suchosti experimentu 4.3

Jako hranice, kdy další sušení vzorku není dostatečně přínosné, byla na základě všech experimentů stanovena hodnota, kdy nárůst stupně suchosti je nižší než 0,6 % za minutu. Tato hodnota byla stanovena pro rychlé sušení v zařízení Cyclone, kde je efektivita strojního času důležitá a sušení celkově kratší. Vzhledem k podstatně nižším rychlostem a delším časům při konvenčním sušení by bylo nutné stanovit pro konvenčně sušené skořepiny jinou hodnotu. V tab. 3 jsou uvedeny čas, kdy rychlost sušení jednotlivých vzorků klesla pod danou úroveň. Kontrolní vzorek je zde uveden pro srovnání.

Tab. 3 Časy dosušení v experimentu 4.3

Vzorek	Čas [min]
1	30
2	15
3	21
4	15
Kontrolní	60

4.4 Vliv teploty a vlhkosti

Druhá sada experimentů měla za účel ukázat, jak velkou změnou v procesu rychlého sušení udělá změna nastavení teploty a vlhkosti. Vyhodnocení vzorků bylo stejné jako v prvním experimentu (viz obr. 42).



Obr. 42 Vzorek během vážení

Interval vážení byl nastaven stejně pro všechny vzorky stejně. V tomto experimentu stroj pracoval v automatickém režimu (viz obr. 43, 44 a 45) nejdříve byly vzorky obaleny primárním obalem a pak pomocí funkce „Layer direct Drying“ a nastavení teploty, vlhkosti a sušicího času (viz tab. 4) byly vzorky sušeny po nastavenou dobu. Automatický režim mírně prodlužoval manipulační časy, neboť nelze vyjmout vzorek před úplným navrácením ramena do počáteční polohy. V tab. 5 jsou uvedeny výsledky experimentu. Nastavená teplota 25° a vlhkost 15 % byla zvolena jako referenční.

Program no.:	2	and Seal Coat	☐
Number of Layers:	1	Layer direct Drying	☒
incl. Primary Layers:	1	Additional Red Lights	☐

Layer	Drying time (Min.)	Tree Temp. (°C)	Dryer Humidity (%)	Fan Rows
1	6	25	10	4

Obr. 43 Program „Layer direct Drying“ při posledním sušení vzorku 14

	Primary		Back Up
1st Slurry Dipping Time	10 sec.		10 sec.
2nd Slurry Dipping Time	30 sec.		30 sec.
Number of draining swivels	6		6
Draining Time Bottom	6 sec.		5 sec.
Draining Time Top	6 sec.		5 sec.
Wax Tree sanding horizontal	6 sec.		4 sec.
Number of sanding swivels	3		3
Waiting Time bottom position	4 sec.		6 sec.
Waiting Time top position	4 sec.		6 sec.
Number of draining swivels	1		1

Obr. 44 Parametry obalování pro všechny vzorky v experimentu 4.4

Dipping angle	15	Degrees
Draining Time Seal Coat	10	min.
Swing angle Rainfall Sander	40	Degrees
Time lag Fan Line 1 On	0	min.
Time lag Fan Line 2 On	0	min.
Time lag Fan Line 3 On	0	min.
Time lag Fan Line 4 On	0	min.

Obr. 45 Parametry obalování a sušení pro všechny vzorky v experimentu 4.4

Tab. 4 Design experimentu 4.4

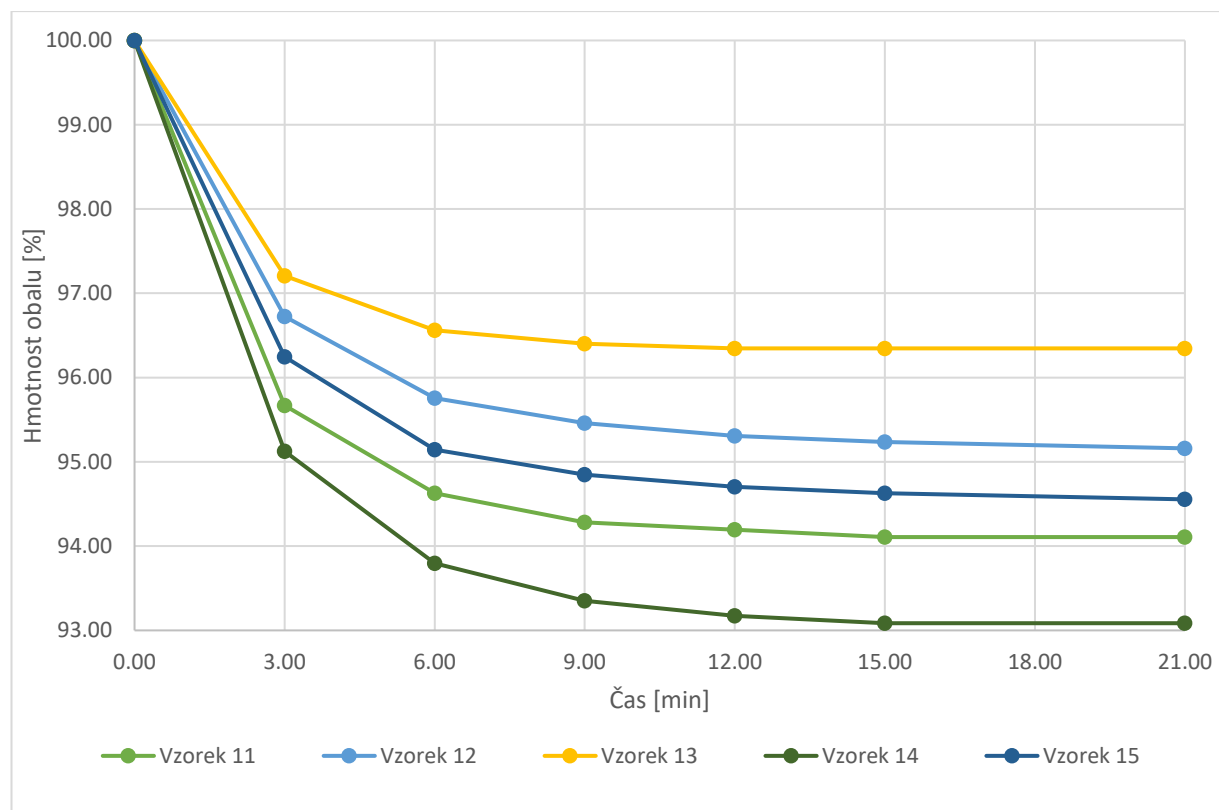
Vzorek	Teplota	Vlhkost
11	25 °C	15 %
12	20 °C	15 %
13	30 °C	15 %
14	25 °C	10 %
15	25 °C	20 %

Tab. 5 Výsledky experimentu 4.4

Čas [min]	% hmotnosti obalu vzorku				
	11	12	13	14	15
0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3	95.67	96.72	97.21	95.12	96.25
6	94.63	95.76	96.56	93.79	95.14
9	94.28	95.46	96.40	93.35	94.85
12	94.19	95.31	96.35	93.17	94.70
15	94.11	95.23	96.35	93.09	94.63
21	94.11	95.16	96.35	93.09	94.55

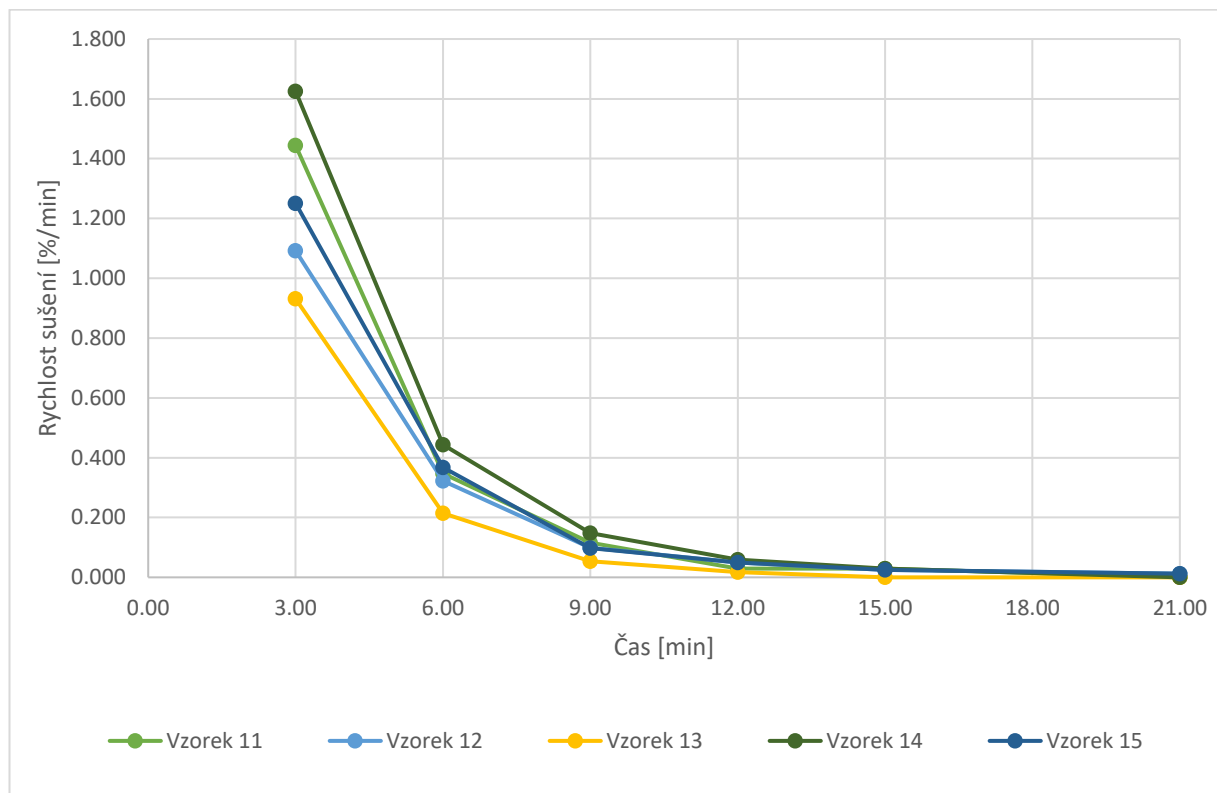
V obr. 46 jsou zaznamenány průběhy sušení jednotlivých vzorků pomocí vývoje procenta hmotnosti obalu v čase. Stejně jako v prvním experimentu se výsledná procenta hmotnosti lišila. Vzorek 14 potvrdil předpoklad, že nižší vlhkost vzduchu v sušící komoře dosáhne většího vysušení. Vzorek 13 dosáhl po dvanácti minutách konstantní hmotnosti, avšak výsledná ztráta hmotnosti byla téměř poloviční vůči

vzorku 14. Referenční vzorek 11 dosáhl konstantní hmotnosti po patnácti minutách stejně jako vzorek 14.



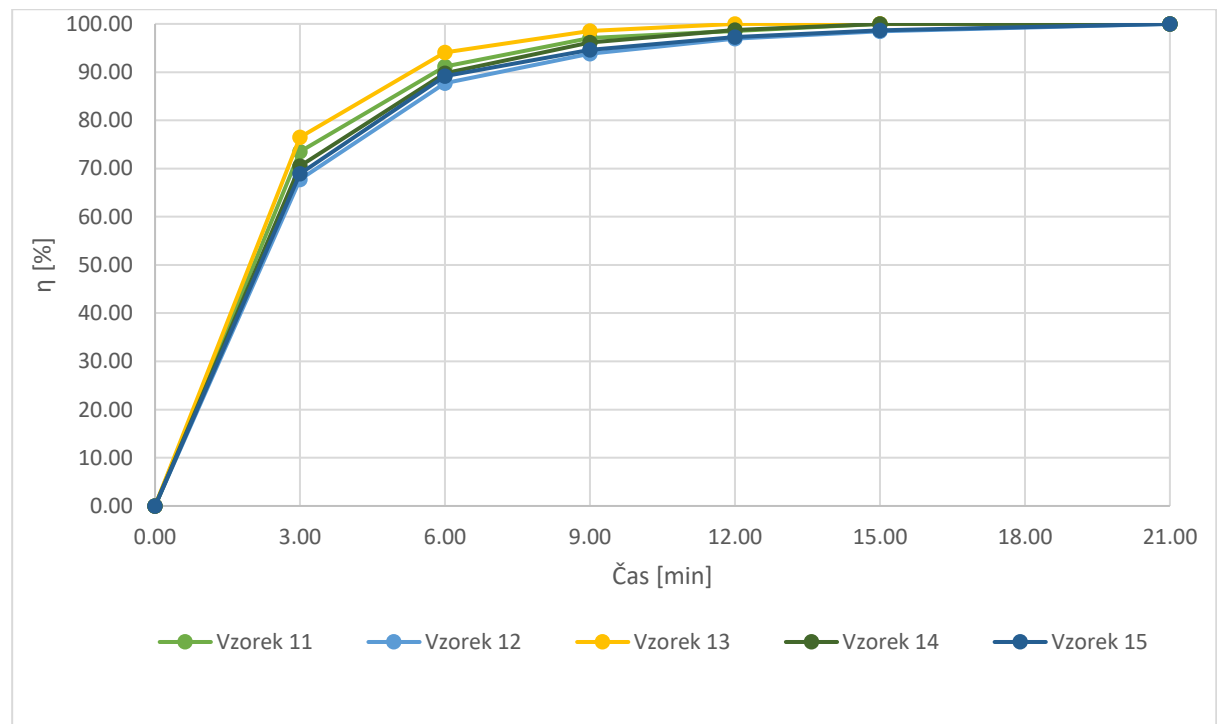
Obr. 46 Graf hmotnosti obalu experimentu 4.4

V obr. 47 je znázorněn úbytek hmotnosti za minutu počítaný pomocí rozdílu hmotnosti a uplynulého času mezi jednotlivými měřeními. Je zde patrná vysoká rychlost sušení vzorku 14 při 10% vlhkosti. Vzorky 12 a 15, jež byly sušeny za méně vhodných podmínek vykazují jistý pokles oproti referenčnímu vzorku 11. Vzorek 13 dosahuje menší rychlosti sušení ve srovnání s ostatními vzorky, protože jeho celková ztráta procentní hmotnosti při sušení byla značně nižší než u ostatních vzorků.

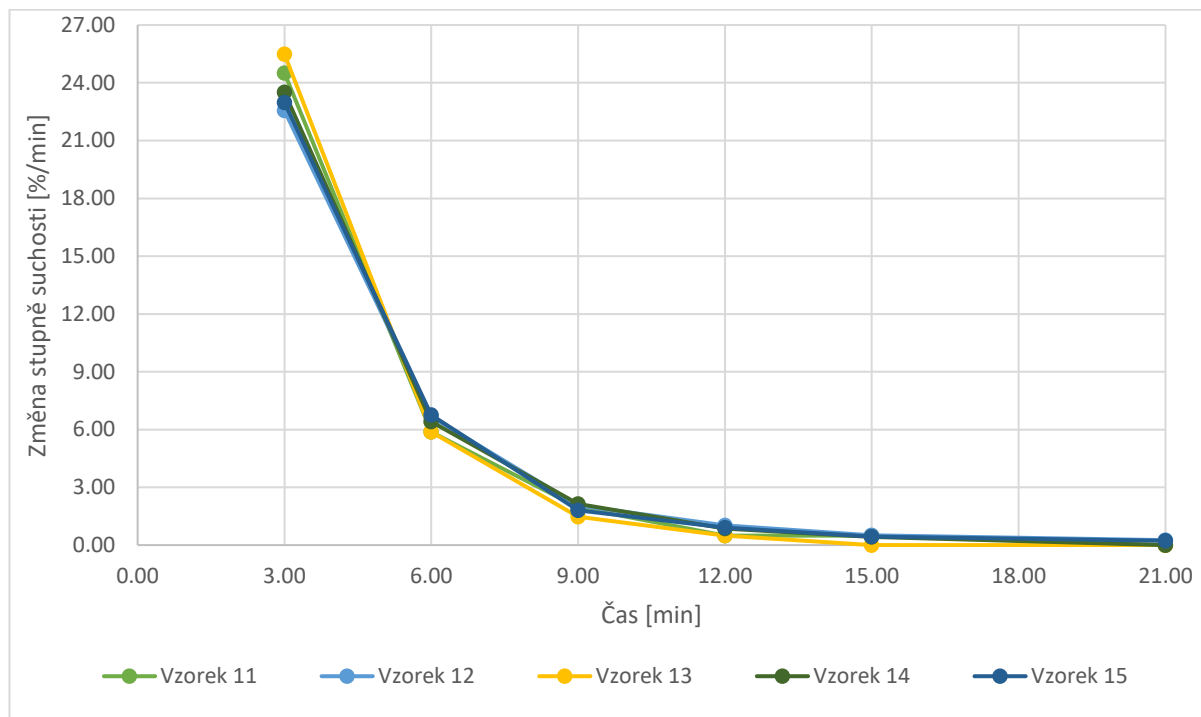


Obr. 47 Graf rychlosti sušení experimentu 4.4

Dále je použit výpočet stupně suchosti podle (5). V obr. 48 je znázorněn vývoj stupně suchosti v čase, který však ukazuje jen velmi malé rozdíly. V obr. 49 je znázorněna změna stupně suchosti v čase, což lépe vystihuje rychlost sušení celého vzorku. Vzorek 13, který dosáhl nižšího výsledného vysušení za krátkou dobu tak pomocí stupně suchosti vyplyne jako nejrychlejší z celého experimentu.



Obr. 48 Graf stupně suchosti experimentu 4.4



Obr. 49 Graf vývoje stupně suchosti experimentu 4.4

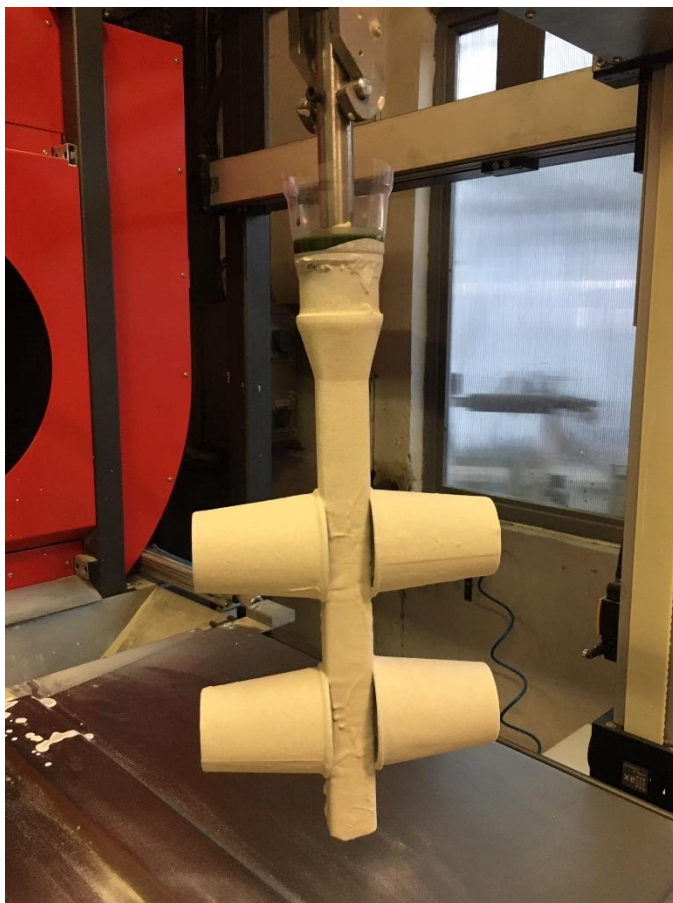
Časy dosušení podle 4.3 pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tab. 6. Vzhledem k tomu, že stupeň suchosti (5) nezohledňuje celkovou ztrátu hmotnosti během sušení, vychází tento čas příznivě pro vzorek 13, avšak jeho ztráta hmotnosti byla značně nízká, což naznačuje možné problémy.

Tab. 6 Časy dosušení experimentu 4.4

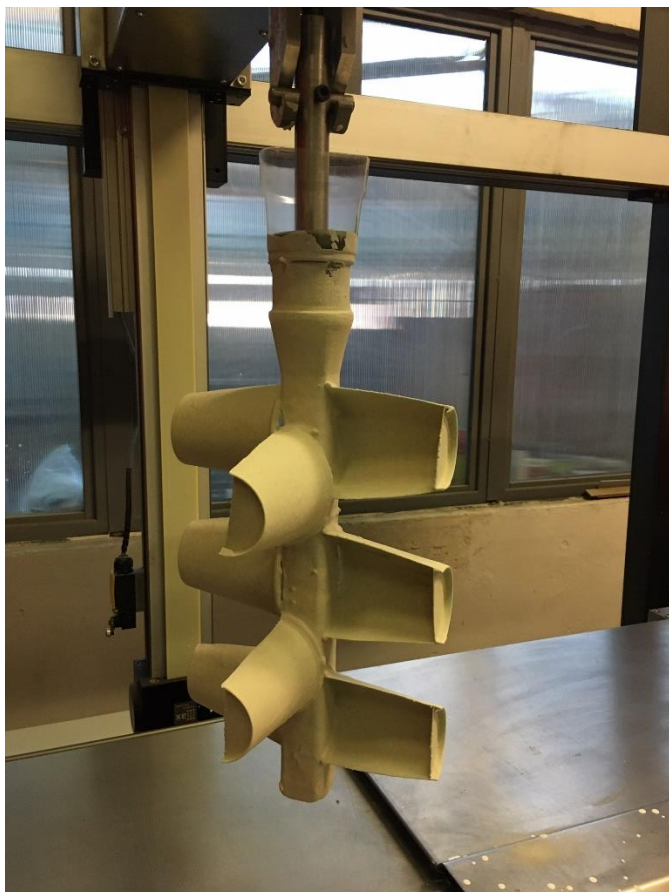
Vzorek	Čas [min]
11	12
12	15
13	12
14	15
15	15

4.5 Sušení uzavřených a otevřených tvarů

V tomto experimentu byl zkoumán vliv tvaru vzorku na proces sušení. Byla použita jednoduchá tělesa tvořená vtokovým kulem a čtyřmi kelímky z voskovaného papíru namáčeného do modelového vosku. Vzorek 21 byl vytvořen ze čtyř celých kelímků (viz obr. 50), zatímco vzorek 22 z osmi půlek kelímků (viz obr. 51). Povoskované kelímky byly připojeny k voskovému kule pájením. Plocha vzniklá řezem kelímků byla velice malá, což ji umožnilo zanedbat a předpokládat tak, že obě tělesa mají stejně velký volný povrch, avšak značně se liší poměrem sušené plochy dutin k volné ploše pro proudění vzduchu.



Obr. 50 Vzorek 21 po dokončení primárního obalu



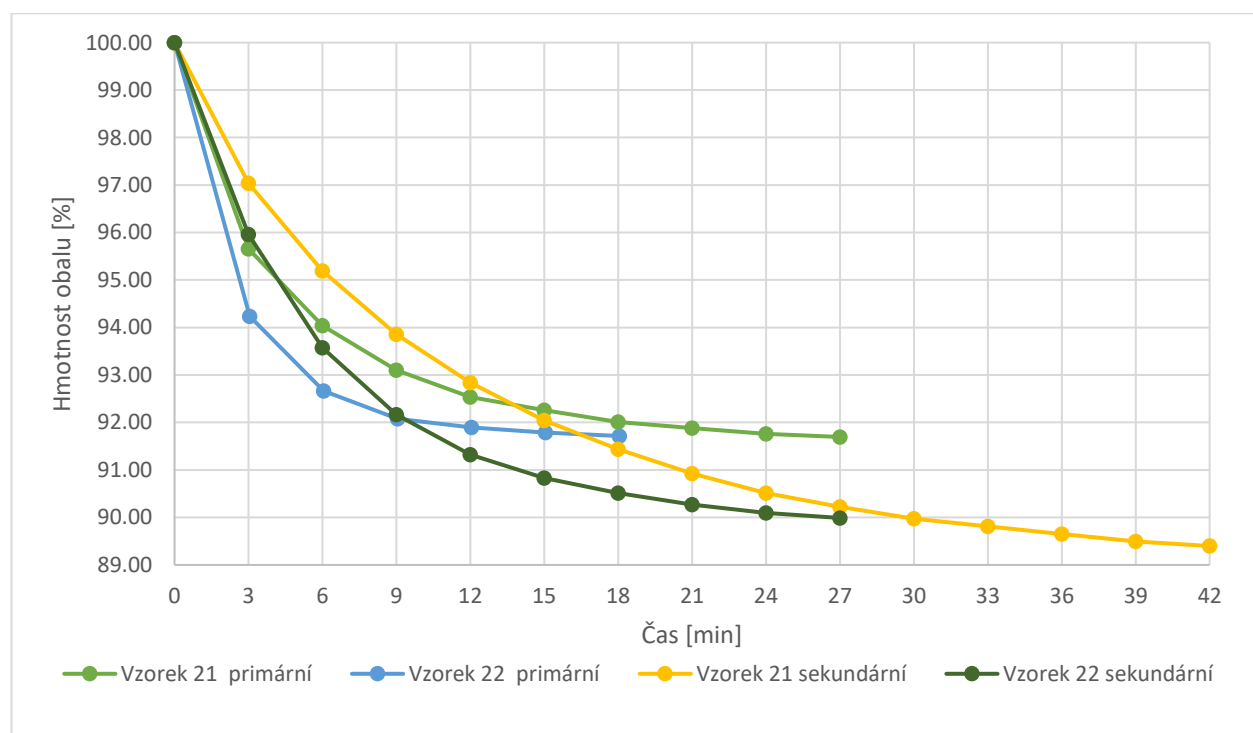
Obr. 51 Vzorek 22 po dokončení primárního obalu.

Vzorky byly sušeny pomocí manuálního režimu s nastavenou teplotou 25 °C a vlhkostí 15 %. Pomocí vážení vzorků byl postupně zkoumán vliv tvaru na sušení primárního a sekundárního obalu. V tab. jsou uvedeny výsledky experimentu.

Tab. 7 Výsledky experimentu 4.5 pro jednotlivé obaly vzorků

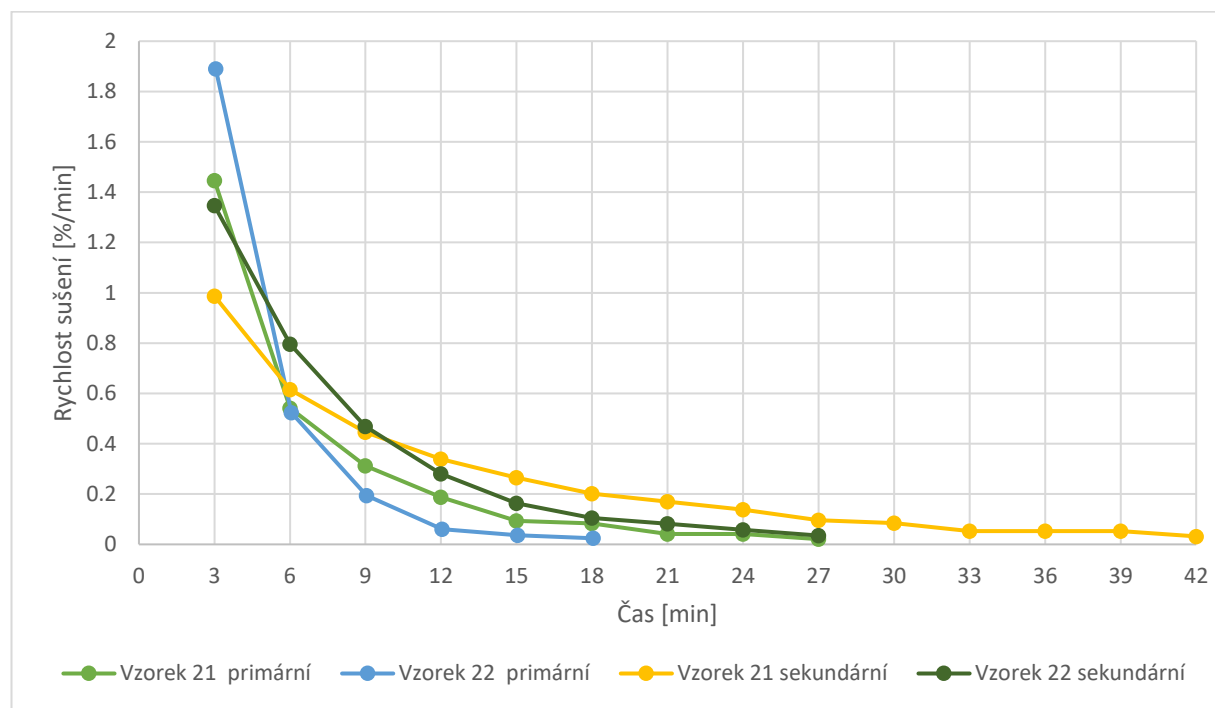
Vzorek 21 primární		Vzorek 21 sekundární		Vzorek 22 primární		Vzorek 22 sekundární	
min	%hm	min	%hm	min	%hm	min	%hm
0	100.00	0	100.00	0	100.00	0	100.00
3	95.66	3	97.04	3.05	94.23	3	95.96
6	94.04	6	95.19	6.05	92.66	6	93.57
9	93.10	9	93.86	9.05	92.08	9	92.17
12	92.54	12	92.84	12.05	91.90	12	91.32
15	92.26	15	92.04	15.05	91.79	15	90.83
18	92.01	18	91.44	18.05	91.72	18	90.52
21	91.88	21	90.93			21	90.27
24	91.76	24	90.51			24	90.09
27	91.70	27	90.23			27	89.99
		30	89.97				
		33	89.81				
		36	89.65				
		39	89.49				
		42	89.40				

V obr. 52 jsou znázorněny průběhy sušení jednotlivých vzorků pomocí vývoje procenta hmotnosti v čase. Je patrný rozdíl mezi sušením primárních a sekundárních obalů. Sekundární obaly dosahují větší ztráty hmotnosti oproti primárním.



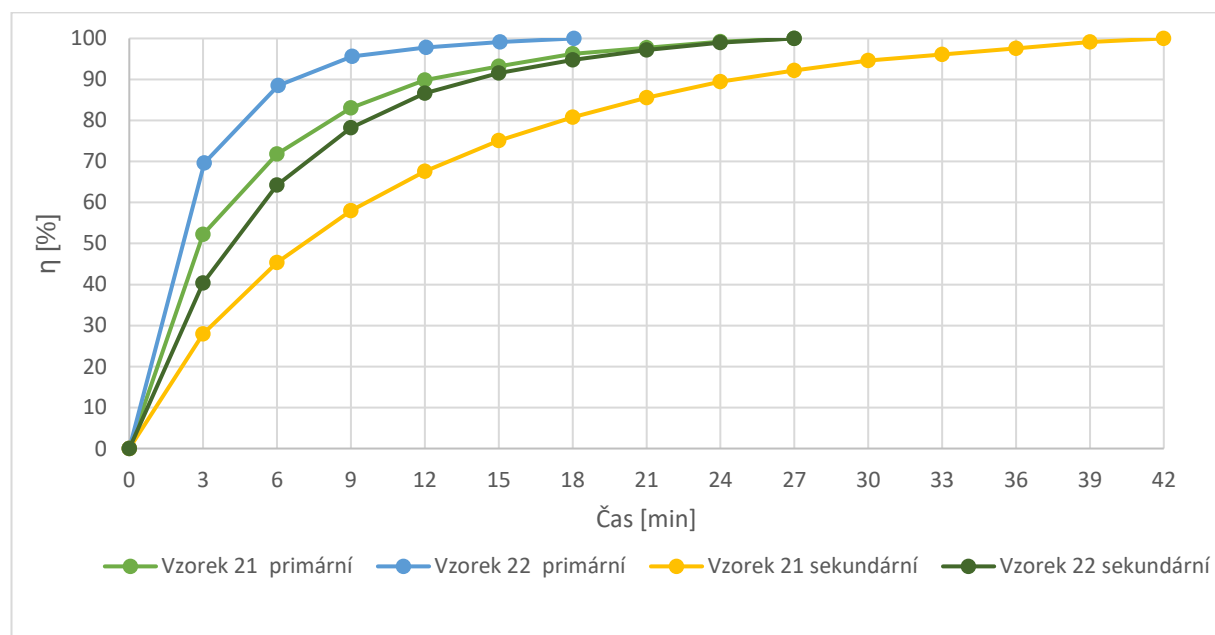
Obr. 52 Graf hmotnosti obalu experimentu 4.5

V obr. 53 je znázorněn úbytek hmotnosti za minutu počítaný pomocí rozdílu hmotnosti a uplynulého času mezi jednotlivými měřeními. Je zde patrná vyšší rychlost sušení vzorku 22 oproti vzorku 21, kdy vzorek 22 má při sekundárním obalu srovnatelnou rychlost sušení se vzorkem 21 při primárním obalu.



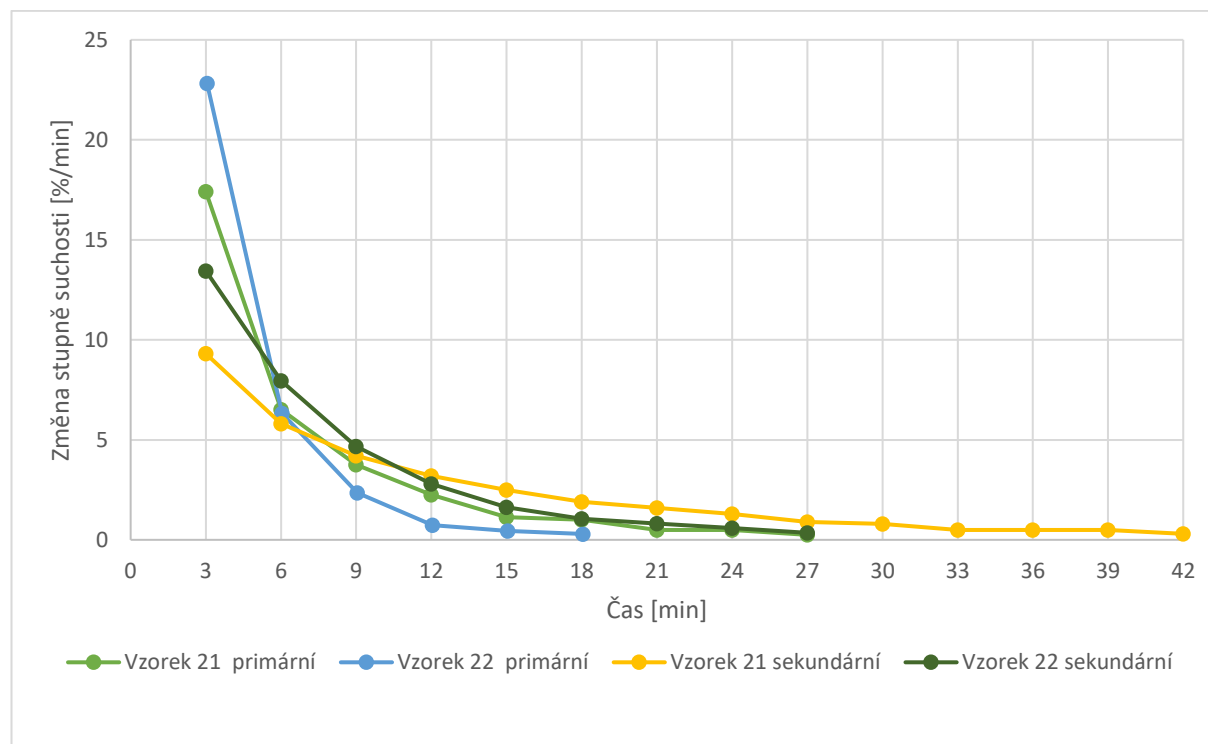
Obr. 53 Graf rychlosti sušení experimentu 4.5

V obr. 54 je znázorněn vývoj stupně suchosti podle (5), která dobře ukazuje srovnatelný průběh sušení vzorku 21 při primárním obalu a vzorku 22 při sekundárním obalu. Také je zde patrný menší nárůst času sušení vzorku 22 mezi primárním a sekundárním obalem než vzorku 21.



Obr. 54 Graf stupně suchosti experimentu 4.5

V obr. 55 je zakreslena změna stupně suchosti za minutu, na které lze dobře sledovat rozdíl rychlosti sušení primárního a sekundárního obalu. Ukazuje se, že uzavřené dutiny výrazně zpomalují sušení a sekundární tento efekt dále prohlubují.



Obr. 55 Graf vývoje stupně suchosti experimentu 4.5

Časy dosušení podle 4.3 jsou uvedeny v tab. 8. Tyto časy opět potvrzují negativní vliv nepřístupných dutin na časy sušení,

Tab. 8 Časy dosušení experimentu 4.5

Vzorek obal	Čas [min]
21 primární	21
22 primární	15
21 sekundární	33
22 sekundární	24

4.6 Sušení při více obalech

Tento experiment měl za úkol ukázat rozdíl sušení při vyšším počtu obalů. Byl obalen vzorek se zkušebním tělesem podle parametrů v obr. 56 a 57 celkem šesti obaly z čehož byl jeden primární. Šestý obal byl vážen během sušení. Sušení probíhalo při 25 °C a 15% relativní vlhkosti. Průběh sušení byl porovnán se vzorkem 11 z experimentu 4.4, kde byl vyhodnocován primární obal sušený za stejných podmínek.

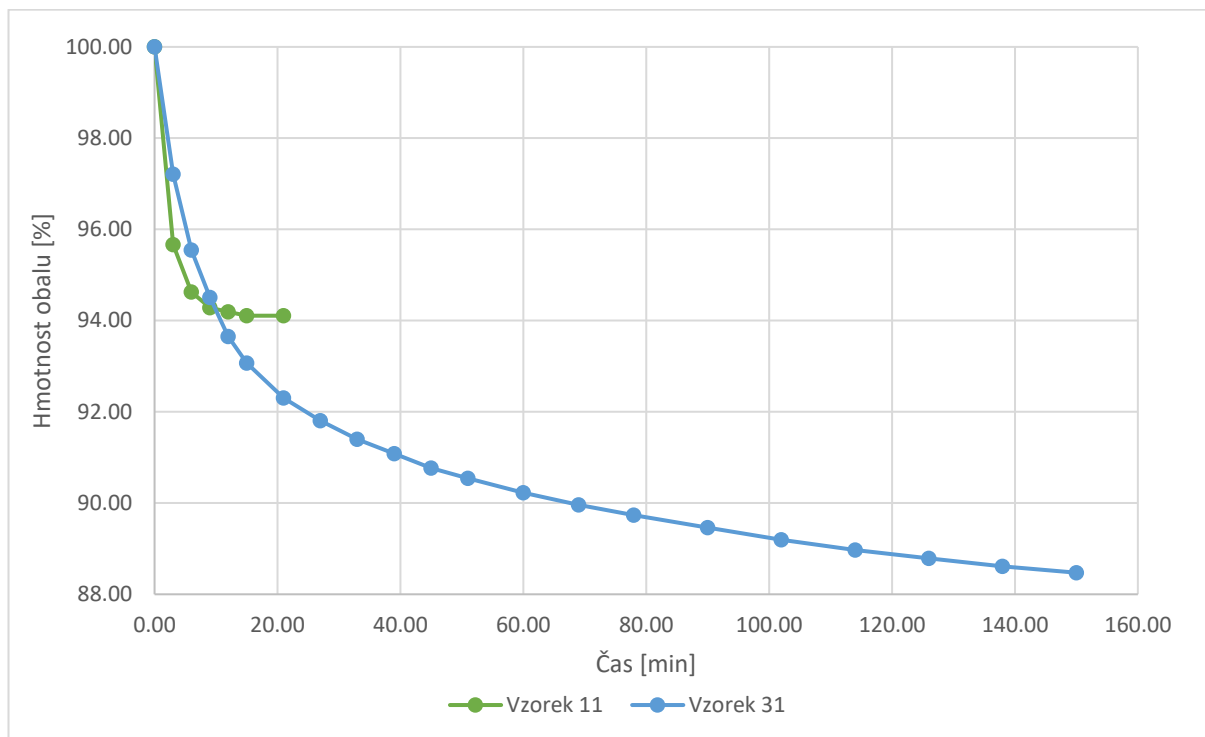
	Primary	Back Up
1st Slurry Dipping Time	20 sec.	60 sec.
2nd Slurry Dipping Time	0 sec.	0 sec.
Number of draining swivels	5	2
Draining Time Bottom	5 sec.	7 sec.
Draining Time Top	5 sec.	7 sec.
Wax Tree sanding horizontal	5 sec.	5 sec.
Number of sanding swivels	3	3
Waiting Time bottom position	5 sec.	5 sec.
Waiting Time top position	5 sec.	5 sec.
Number of draining swivels	4	4

Obr. 56 Parametry obalování v experimentu 4.6

Dipping angle	20 Degrees
Draining Time Seal Coat	10 min.
Swing angle Rainfall Sander	30 Degrees
Time lag Fan Line 1 On	1 min.
Time lag Fan Line 2 On	2 min.
Time lag Fan Line 3 On	3 min.
Time lag Fan Line 4 On	4 min.

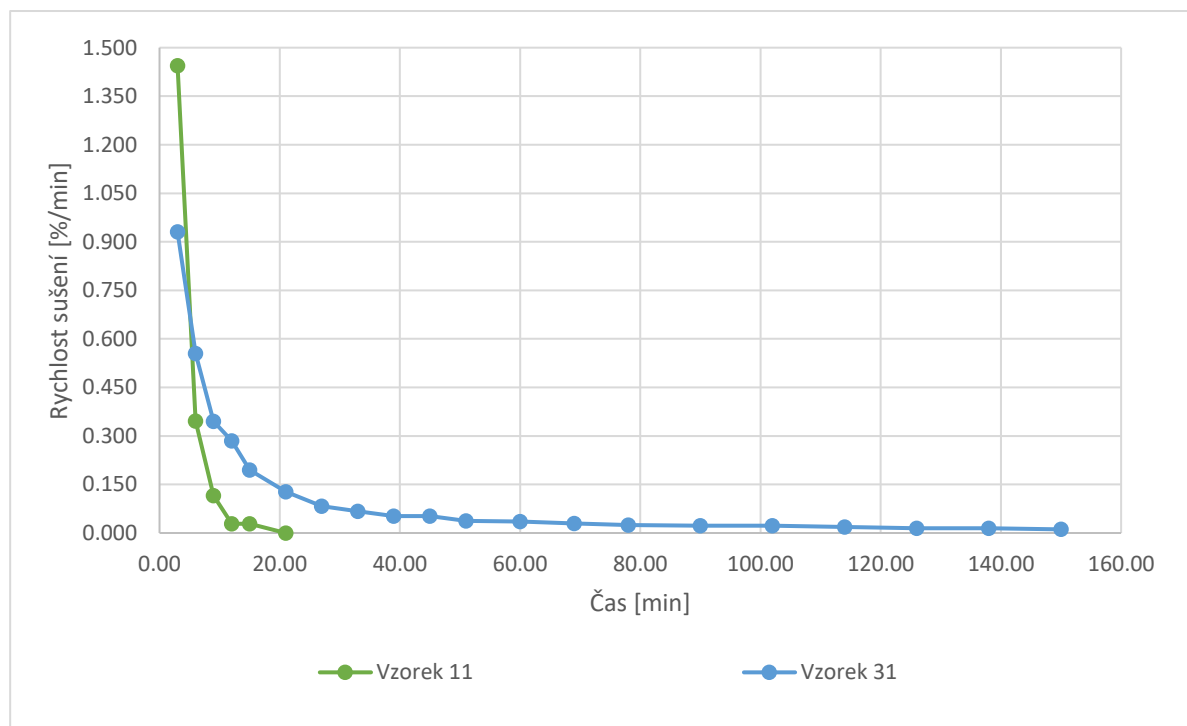
Obr. 57 Parametry obalování a sušení v experimentu 4.64.5

V obr. 58 je vidět mnohem pomalejší průběh sušení a daleko větší ztráta hmotnosti šestého obalu oproti primárnímu.



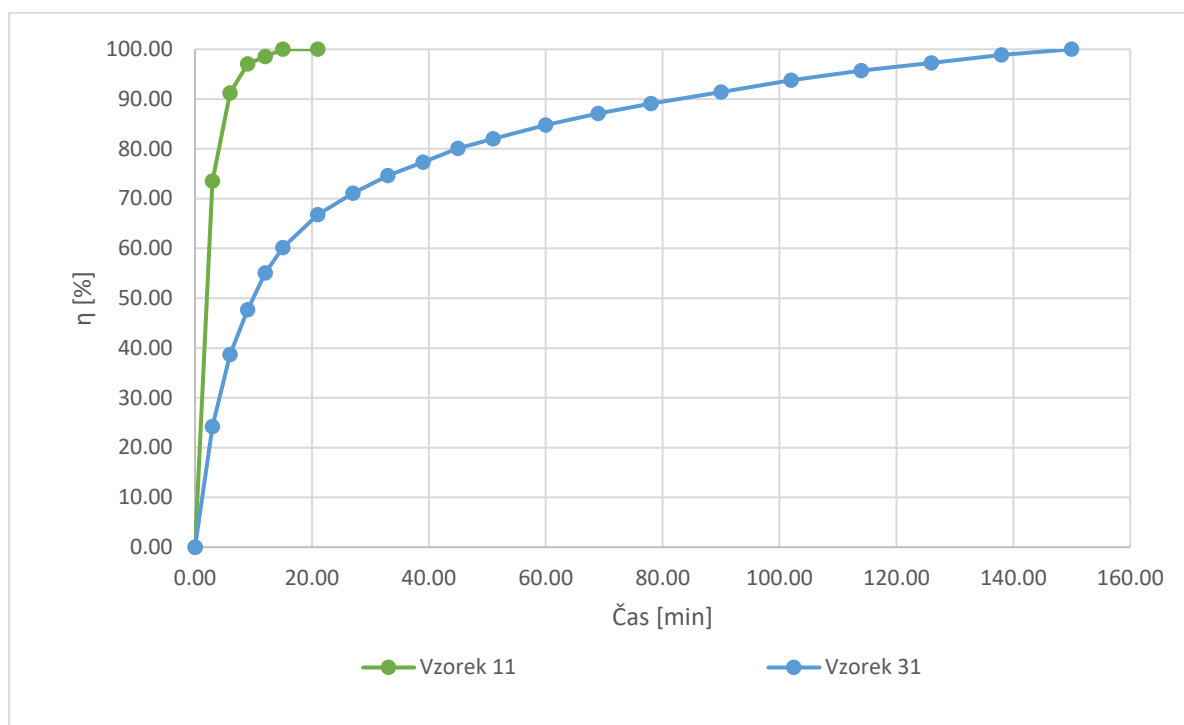
Obr. 58 Graf hmotnosti obalu experimentu 4.6

Srovnáním rychlosti sušení v obr. 59 lze získat lepší představu o dynamice procesu.

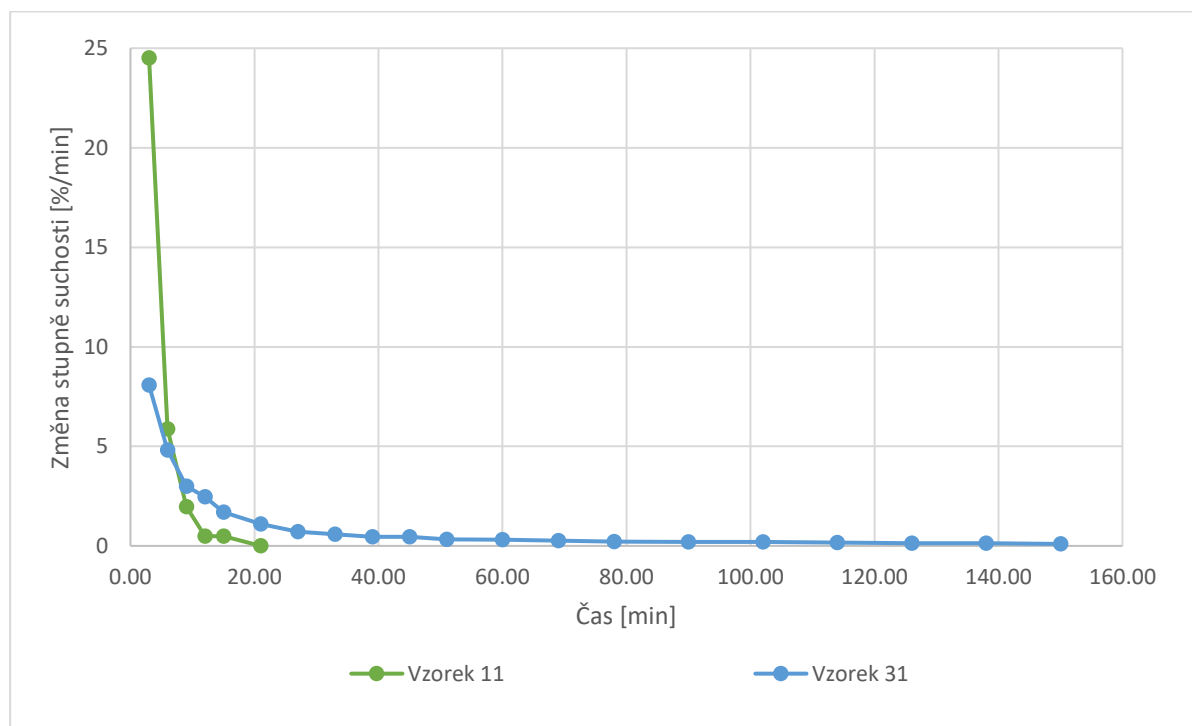


Obr. 59 Graf rychlosti sušení experimentu 4.6

Pomocí stupně suchosti (5) vynikne rozdíl celkového sušícího času v obr. 60. Např. v čase 9 min je stupeň suchosti vzorku 11 97 % a stupeň suchosti vzorku 31 je teprve 48 %. Změna stupně suchosti ukazuje větší kontrast mezi prvním a šestým obalem (viz obr. 61).



Obr. 60 Graf stupně suchosti experimentu 4.6



Obr. 61 Graf vývoje stupně suchosti experimentu 4.6

Časy dosušení podle 4.3 jsou uvedeny v tab. 9. Vliv většího počtu obalů je zde patrný a je tedy nutné tento vliv vzít v potaz při navrhování technologie sušení.

Tab. 9 Časy dosušení experimentu 4.6

Vzorek	Čas [min]
11	12
31	33

4.7 Porovnání pevností

Tento experiment měl ověřit tvrzení z článku [2] o vyšší pevnosti skořepin sušených v zařízení Cyclone oproti skořepinám vyrobených konvenčně. Bylo navrženo porovnat pevnosti skořepin pomocí zkoušky pevnosti v ohybu na dvou odlišných syrových skořepinách. Modely pro odběr vzorků na zkoušky čtyřbodovým ohybem byly tvořena pouze holými vtokovými kůly, aby byla dosaženo větší rovné plochy pro odběr vzorků. Obě skořepiny byly vyrobeny obalováním na zařízení Cyclone (viz obr. 62) za použití stejného programu a parametrů (viz obr. 63 a 64), avšak jedna skořepina prošla kompletní cyklus na zařízení Cyclone, zatímco druhá byla vždy po obalení vyjmuta ze stroje a ponechána schnout v klimatizované místnosti. Skořepina vyrobená na zařízení Cyclone bylo vyrobena za přibližně tři hodiny, zatímco konvenčně sušená skořepina byla sušena minimálně šest hodin mezi obaly, které bylo prováděny dopoledne a odpoledne po dobu tří dnů. Interval minimálně šesti hodin byl zvolen na základě studie [10], která uvádí jako optimální čas sušení čtyři hodiny.

Program no.:	1	and Seal Coat		
Number of Layers:	6	Layer direct Drying		
incl. Primary Layers:	1	Additional Red Lights		
Layer	Drying time (Min.)	Tree Temp. (°C)	Dryer Humidity (%)	Fan Rows
1	25	25	15	4
2	25	25	15	4
3	25	25	15	4
4	25	25	15	4
5	25	25	15	4
6	25	25	15	4

Obr. 62 Program použitý k výrobě skořepin pro porovnání pevností

	Primary	Back Up
1st Slurry Dipping Time	5 sec.	5 sec.
2nd Slurry Dipping Time	0 sec.	0 sec.
Number of draining swivels	5	2
Draining Time Bottom	5 sec.	4 sec.
Draining Time Top	5 sec.	4 sec.
Wax Tree sanding horizontal	5 sec.	5 sec.
Number of sanding swivels	3	3
Waiting Time bottom position	5 sec.	5 sec.
Waiting Time top position	5 sec.	5 sec.
Number of draining swivels	3	3

Obr. 63 Parametry použité při obalování obou vzorků a sušení prvního vzorku

Dipping angle	15 Degrees
Draining Time Seal Coat	10 min.
Swing angle Rainfall Sander	30 Degrees
Time lag Fan Line 1 On	1 min.
Time lag Fan Line 2 On	2 min.
Time lag Fan Line 3 On	3 min.
Time lag Fan Line 4 On	4 min.

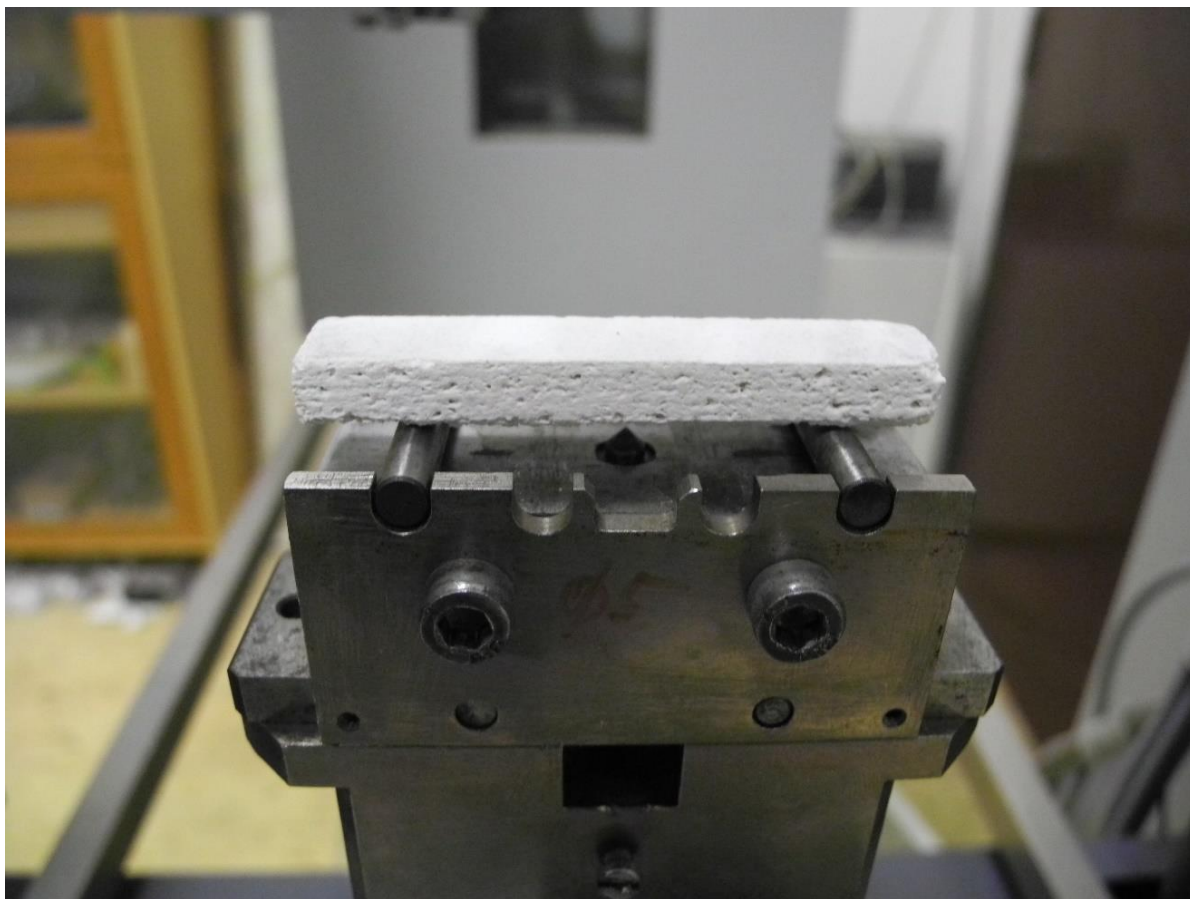
Obr. 64 Parametry použité při obalování obou vzorků a sušení prvního vzorku

Po dokončení obalování byly skořepiny bez vytavení rozříznuty na větší vzorky, ze kterých byly vybroušeny vzorky (viz obr. 65) 12 mm široké a minimálně 55 mm dlouhé. Zkoušky byly provedeny na ústavu materiálů věd a inženýrství VUT v Brně na

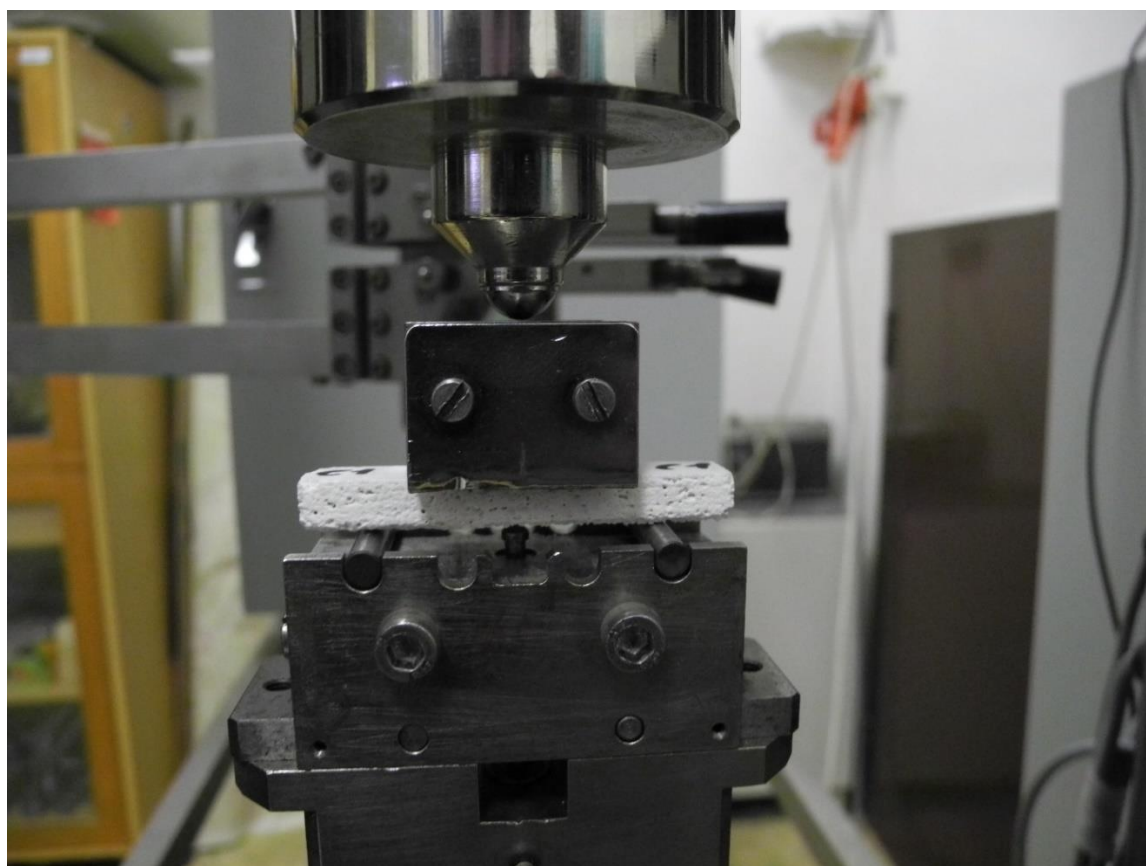
stroji Zwick Z020 s použitím siloměru rozsahu 2,5 kN s krokem 0,1 N a inkrementálním snímačem průhybu. Bylo použito uspořádání čtyřbodového ohybu typu B podle [15] s roztečí 40 mm mezi vnějšími podpěrami a 20 mm mezi zatěžujícími válečky. Zatěžující válečky i válečky podpěr měly průměr 5 mm (viz obr. 66). Přípravek se zatěžujícími válečky byl se zatěžující hlavou v kontaktu pomocí kuličky z kalené oceli o průměru 10 mm (viz obr. 67) za účelem lepší kompenzace nerovností vzorků a zamezení torzního zatěžování. Dohromady byly zkoušeny tři vzorky z každé skořepiny, jejichž pevnost byla zaznamenána, spočten průměr a určena směrodatná odchylka (viz tab. 10).



Obr. 65 Vzorky před zkouškou pevnosti v ohybu.



Obr. 66 Vzorek umístěný na podpěry.



Obr. 67 Vzorek během zkoušky pevnosti v ohybu.

Tab. 10 Výsledky čtyřbodového ohybu

	Cyclone	Konvenční
Vzorek C1 K4	3.55	3.02
Vzorek C2 K5	3.36	2.83
Vzorek C3 K6	3.36	2.90
Průměr	3.423	2.916
Směrodatná odchylka	0.0895	0.0784

Z výsledků je patrné, že skořepina sušená v zařízení Cyclone je přibližně o 17 % pevnější než skořepina sušená konvenčně. Z obr. 68 je patrná vyšší porezita ve vzorcích sušených konvenčně. Tato porezita zřejmě způsobuje nižší pevnost vzorků sušených konvenčně.



Obr. 68 Snímek skořepin sušených konvenčně (nahore) a v Cyclone (dole) pořízený ze stereolupy.

ZÁVĚR

V práci je uveden přehled základní teorie sušení skořepin a popsáno zařízení Cyclone. Je prováděno několik experimentů, které poskytují náhled na celou problematiku rychlého sušení a rychlé výroby skořepin. Experiment 4.3 ukázal velký vliv větráků na rychlost sušení a nízký vliv infračervených zářičů. Z experimentu 4.4 je pak patrný velký vliv vlhkosti vzduchu na celkové vysušení skořepiny. Z toho lze vyvodit, že regulaci rychlosti sušení lze nejlépe provádět nastavováním množství aktivních větráků, nastavením jejich časové prodlevy a nastavením vlhkosti vzduchu. Vzhledem k tomu, že literatura uvádí jako příčinu praskání tepelnou dilataci není možné doporučit urychlování sušení vyšší teplotou, a to i s ohledem na riziko deformace či ztráty pevnosti voskového modelu za vyšších teplot. 4.5 ukazuje vliv přítomnosti nepřístupných a komplikovaných tvarů, který je nutno brát v potaz při návrhu postupu výroby skořepiny. 4.6 pak ukazuje nutnost prodloužení sušících časů při větším množství obalů, které taktéž zpomaluje sušení. Oba tyto faktory je nutné vzít v potaz při návrhu výrobního postupu složitějších součástí a zejména pak u součástí ze slitin s vyššími nároky, kde je požadováno větší množství obalů. U skořepin se zpomaleným sušením vlivem tvaru a většího množství obalů je možné zvýšit intenzitu sušení nastavením nižší vlhkosti v komoře či maximálním zapnutím větráků. 4.7 srovnává pevnost skořepin vyrobených konvenčním sušením s pevností skořepiny vyrobené na zařízení Cyclone pomocí zkoušek pevnosti ve čtyřbodovém ohybu. Rychle sušená skořepina v syrovém stavu vychází o 17 % pevnější než její konvenčně sušený ekvivalent obalovaný za stejných podmínek. Tato skutečnost je technologicky pozitivní, a to obzvláště u větších či více namáhaných skořepin, kde lze použít méně obalů a ušetřit tak náklady na materiál a procesní čas. Během vyhodnocování tohoto experimentu padla zásadní otázka pro budoucí zkoumání, a to zda toto zvýšení pevnosti ovlivnilo prodyšnost skořepiny, či nikoliv. Dalším předmětem při další výzkum je stanovení konkrétních podmínek sušení, při kterých dochází k porušení skořepiny.

Limitujícím faktorem experimentů je vážení vzorků v krocích a s tím spojené manipulační časy. Optimální sledování by bylo možné pomocí vážení v reálném čase, které je ovšem komplikovaně proveditelné vzhledem k tomu, že skořepiny jsou do sušící komory umísťovány vodorovně. Přesnost měření je dalším omezujícím faktorem. Také hodnocení pevnosti je limitováno nepřesnostmi měření, které jsou v tomto případě způsobeny nerovnostmi povrchu a případnými defekty.

V 3.3 je popsána kombinovaná zkouška k zjištění prodyšnosti i pevnosti. Tato zkouška vyplývá jako nejvhodnější pro stanovování provozních vlastností skořepin za tepla i za studena. Náklady na tuto zkoušku jsou v literatuře popisovány jako znatelně nižší než náklady na zkoušku pevnosti v ohybu za provozních teplot. Příprava zkušebních těles pro tuto zkoušku je navíc mnohem jednodušší a omezuje riziko ovlivnění výsledku zkoušky.

Zařízení Cyclone se ukázalo být velkým přínosem proces výroby skořepin. Skořepina vyrobená v 4.7 na zařízení za tři hodiny byla pevnější než tři dny vyráběná konvenční skořepina. Rychlé sušení v zařízení Cyclone je na odboru slévárenství při VUT v Brně využíváno k rychlé výrobě prototypů i za pomocí modelů vyrobených 3D tiskem, čímž je vynechán dlouhý čas výroby matečné formy a rychlost výroby skořepiny je větší výhodou.

BIBLIOGRAFIE

- [1] BEELEY, Peter a Robert SMART. *Investment Casting*. United Kingdom: Maney Publishing, 1994. ISBN 0901716669.
- [2] KÜGELGEN, Michael. *68th World Foundry Congress 2008 (WFC 2008): Proceedings of a meeting held 7-11 February 2008, Chennai, India*. [online]. Chennai, India: Curran Associates, Inc., 2012 [cit. 2020-05-25]. ISBN 9781622763832. Dostupné z: <http://www.proceedings.com/16097.html>
- [3] SIDHU, Balwinder, Pradeep KUMAR a B.K. MISHRA. Effect of Slurry Composition on Plate Weight in Ceramic Shell Investment Casting. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. Boston: Springer US, 2008, **17**(4), 489-498 [cit. 2020-06-23]. DOI: 10.1007/s11665-007-9162-8. ISSN 1059-9495. Dostupné z: https://search.proquest.com/docview/33554839?rfr_id=info%3Axri%2Fsid%3Aprim
- [4] PRASAD, Ram. Progress in Investment Castings. *Science and Technology of Casting Processes*. InTech, 2012. DOI: 10.5772/50550. ISBN 978-953-51-0774-3. Dostupné také z: <http://www.intechopen.com/books/science-and-technology-of-casting-processes/progress-in-investment-castings>
- [5] GUERRA, Manuel. Drying of Ceramic Shells – The Theory. In: *Remet* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.remet.com/en/insights/drying-of-ceramic-shells-the-theory/>
- [6] BROSMAN, Denis a Gilbert ROBINSON. *Introduction to drying of ceramics*. Westerville, Ohio: The American Ceramic Society, 2003. ISBN 1-57498-046-7.
- [7] HARUN, Zawati, D. GETHIN, R. LEWIS a W. FERGUSON. *Drying of a Multilayer Ceramic Shell Body: Proceedings of the 15th UK Conference of the Association of Computational Mechanics in Engineering*,. 2007. DOI: 10.4203/ccp.85.16. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/256702907_Drying_of_a_Multilayer_Ceramic_Shell_Body
- [8] BRIENZA, Michael, Danielle KAYE, Andrew BROWSKY, Nicholas DOIRON a Mark OLES. *Intercoat Drying and Shell Properties*. Milford, New Hampshire: Hitchiner Manufacturing Co. Inc.
- [9] ZYCH, Jerzy a Tomasz SNOPIKIEWICZ. DRYING AND HARDENING OF CERAMIC MOULDS APPLIED IN THE INVESTMENT CASTING TECHNOLOGY - INVESTIGATIONS OF THE PROCESS KINETICS. *Metallurgy and Foundry Engineering*. 2011, **37**(1). DOI: <http://dx.doi.org/10.7494/mafe.2011.37.1.41>. ISSN 1230-2325.
- [10] GUERRA, Manuel. Drying of Ceramic Shells – The Practice. In: *Remet* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.remet.com/en/insights/drying-of-ceramic-shells-the-practice/>
- [11] ZYCH, J., J. KOLCZYK a Ł. JAMROZOWICZ. The influence of the shape of wax pattern on the kinetics of drying of ceramic moulds. *Metalurgija* [online]. Croatian Metallurgical Society, 2015, **54**(1), 15-18 [cit. 2020-06-19]. ISSN 0543-5846. Dostupné z: <https://doaj.org/article/8de51693436c426698bbff03fd8c2cd3>
- [12] Cyclone by MK Technology. *MK Technology* [online]. [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.mk-technology.com/?pageID=152>

- [13] EVERHART, W., S. LEKAKH, V. RICHARDS, J. CHEN, H. LI a K. CHANDRASHEKHARA. Corner Strength of Investment Casting Shells. *International Journal of Metalcasting* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2013, **7**(1), 21-27 [cit. 2020-06-18]. DOI: 10.1007/BF03355541. ISSN 1939-5981. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=85199918&lang=cs&site=ehost-live>
- [14] LEE, Kevin, Stuart BLACKBURN a Stewart WELCH. A more representative mechanical testing of green state investment casting shell. *Ceramics International* [online]. Elsevier Ltd, 2017, **43**(1), 268-274 [cit. 2020-06-20]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2016.09.149. ISSN 0272-8842. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884216316856>
- [15] ČSN EN 843-1. *Speciální technická keramika - Mechanické vlastnosti monolitické keramiky při pokojové teplotě - Část 1: Stanovení pevnosti v ohybu*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [16] Bending Strength. *Breviary Technical Ceramics* [online]. [cit. 2020-06-20]. Dostupné z: http://www.keramverband.de/brevier_engl/10/5/1/10_5_1.htm
- [17] AMIRA, S, D DUBÉ a R TREMBLAY. Method to determine hot permeability and strength of ceramic shell moulds. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2011, **211**(8), 1336-1340 [cit. 2020-06-20]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.03.002. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013611000653>
- [18] TAMTA, K a Db KARUNAKAR. Enhancing mechanical properties and permeability of ceramic shell in investment casting process. *Materials And Manufacturing Processes* [online]. TAYLOR & FRANCIS INC, 2019, **34**(6), 612-623 [cit. 2020-06-20]. DOI: 10.1080/10426914.2018.1532088. ISSN 1042-6914. Dostupné z: <https://www-tandfonline-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/doi/full/10.1080/10426914.2018.1532088>