



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MODIFIKACE KERAMICKÝCH SKOŘEPINOVÝCH FOREM PRO ZVÝŠENÍ JEJÍ ROZPADAVOSTI PO ODLITÍ

MODIFICATION OF CERAMIC SHELLS TO INCREASE ITS BREAK UP AFTER CASTING PROCESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Natália Škriečková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Bc. Natália Škriečková
Studijní program:	Slévárenská technologie
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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:

Modifikace keramických skořepinových forem pro zvýšení její rozpadavosti po odlití

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozpadavost keramických skořepin po odlití je důležitou vlastností, která může výrazně ovlivnit cenu cídírenských operací. Dobrá rozpadavost může být problémem u tvarově složitějších skořepin, kde se vyskytují uzavřené prostory a dutiny. Optimalizací parametrů keramických suspenzí je možné rozpadavost určitým způsobem ovlivnit. Poměr tuhých částic v pojivu (binder solids) a celkově v systému určuje poměr mezi rozpadavostí, prodyšností a mechanickými vlastnostmi skořepin.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je navrhnout opatření v provozu slévárny Moravia Tech, a.s., která by vedla ke zlepšení rozpadavosti skořepin pro stávající technologii výroby.

Dílčí cíle:

- rozbor problematiky rozpadavosti keramických skořepin,
- návrh opatření v provozu Moravia Tech, a.s.,
- analýza a vyhodnocení provedených změn,
- závěry a doporučení.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, P.R., R.F. SMART. Investment Casting. 2 ed. London: The Institute of Materials, 2009, 486 s. ISBN 1-906540-57-8.

SINGH, S. Precision investment casting: A state of art review and future trends. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture [online]. 2016, 230(12), 2143 - 2164 [cit. 2021-10-19]. ISSN 0954-4054. Dostupné z: doi:10.1177/0954405415597844

LEE, W.H., Y.F. WU, Y.Ch. DING, T.W. CHENG. Fabrication of Ceramic Moulds Using Recycled Shell Powder and Sand with Geopolymer Technology in Investment Casting. Applied Sciences [online]. 2020, 10(13) [cit. 2021-10-20]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10134577

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou rozpadavosti škrupinových foriem po odliatí. Príliš vysoká zvyšková pevnosť zvyšuje náklady na operácie spojené s konečným očisťovaním odliatkov. Cieľom bolo analyzovať súčasný stav a optimalizovať výrobu foriem vo firme MoraviaTech a.s tak, aby bolo odstránenie keramického obalu po odliatí jednoduchšie. V prvej časti je vypracovaný literárny rozbor vplyvov, ktoré by mohli mať pozitívny účinok na rýchlosť odstraňovania škrupín. V praktickej časti sú prevádzané experimenty zrovnávajúce množstvo odstránenej škrupiny v závislosti na čase medzi modifikovanými keramickými škrupinami a škrupinami vyrobenými v danej firme. V poslednej časti sú vyhodnotené výsledky jednotlivých meraní a z nich vyvedené závery a odporúčenia pre firmu MoraviaTech a.s.

Kľúčové slová

technológia vytaviteľného modelu, rozpadavosť, keramická škrupinová forma

ABSTRACT

This master's thesis deals with the problem of the disintegration of shell moulds after casting. Too high residual strength increases the cost of operations associated with the final cleaning of castings. The aim was to analyze the current state of the art and to optimize the production of moulds in MoraviaTech a.s. so that the removal of the ceramic shell after casting is easier. In the first part, a literature analysis of the influences that could have a positive effect on the speed of shell removal is made. In the practical part, experiments are conducted comparing the amount of shell removed as a function of time between modified ceramic shells and shells produced by the company. In the last part, the results of the individual measurements are evaluated and conclusions and recommendations for MoraviaTech a.s. are drawn from them.

Key words

investment casting, removal, ceramic shell mould

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠKRIEČKOVÁ, Natália. *Modifikace keramických skořepinových forem pro zvýšení její rozpadavosti po odlití* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139814>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu na téma Modifikace keramických skořepinových forem pro zvýšení její rozpadavosti po odlití vypracovala samostatne s využitím uvedené literatury a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho práce.

Brno, 20.5.2022

Natália Škriečková

POĎAKOVANIE

Rada by som poďakovala Ing. Vladimírovi Krutišovi, Ph.D. za cenné rady, pripomienky, trpezlivosť a odborné vedenie pri spracovaní diplomovej práce.

Ďalej by som sa chcela poďakovať pánovi Petrovi Čundovi a všetkým pracovníkom vo firme MoraviaTech a.s. za pomoc, rady a podporu pri spracovaní diplomovej práce. Súčasne ďakujem za pomoc pánovi Ondrejovi Štočkovi a Ing. Radimovi Jelínkovi.

V neposlednom rade veľké poďakovanie patrí mojej rodine a najbližším, ktorí ma podporovali po celú dobu štúdia.

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 MOTIVÁCIA A METODIKA RIEŠENIA PROBLÉMU.....	10
2 SPÔSOBY ODSTRAŇOVANIA KERAMICKEJ ŠKRUPINY	11
2.1 Mechanické metódy	11
2.1.1 Vytĺkanie/ vyrážanie	11
2.1.2 Tryskanie vysokotlakovým vodným lúčom	12
2.1.3 Tryskanie abrazívami.....	12
2.2 Chemické metódy	14
2.2.1 Kúpeľ s rozpustenou soľou	14
2.2.2 Horúca vodná žieravá kúpeľ	15
2.2.3 Kúpeľ v kyseline fluorovodíkovej.....	15
3 VPLYVY NA ROZPADAVOSŤ	16
3.1 Materiál.....	16
3.1.1 Spojivá	16
3.1.2 Žiaruvzdorné materiály.....	17
3.3 Metódy nanášania posypu	22
3.3.1 Gravitačný posyp	22
3.3.2 Fluidný posyp	23
3.4 Namáčanie a sušenie	25
3.4.1 Doba ponorenia	25
3.4.2 Doba sušenia a zmršťovanie.....	26
3.4.3 Teplota a doba žihania	28
4 MOŽNOSTI SKÚŠANIA KERAMICKÝCH SUSPENZIÍ A ŠKRUPÍN	29
4.1 Skúšky keramickej suspenzie	29
4.1.1 Kontrola hustoty	29
4.1.2 Kontrola viskozity	29
4.1.3 Test obsahu pevných látok v spojive (Binder solid).....	30
4.1.4 Test obsahu žiaruvzdorných látok v spojive (Total solid)	31
4.2 Skúšky keramickej škrupiny.....	31
4.2.1 Pevnosť v ohybe (MOR).....	31
4.2.2 Upravené lomové zaťaženie (AFL)	33
4.2.3 Pripustnosť.....	34
4.2.4 Skenovacia elektrónová mikroskopia (SEM).....	35
4.2.5 Tepelná rozťažnosť	35
5 MOŽNOSTI MODIFIKÁCIE KERAMICKÝCH SUSPENZIÍ	37
5.1 Modifikácia organickými látkami.....	37
5.1.1 Nylonové vlákna.....	37
5.1.2 Pilinový prach.....	39
5.1.3 Vlákna z pálky širokolistej.....	40
5.1.4 Zrecyklované odpadové materiály.....	42
5.2 Modifikácia solami alkalických zemín	43
6 NÁVRH METODIKY TESTOVANIA ROZPADAVOSTI	45

6.1	Skúšobné teleso.....	45
6.2	Príprava keramickej škrupiny	45
•	VARIANTA A.....	47
•	VARIANTA B.....	47
•	VARIANTA C.....	50
6.3	Skúšky pevnosti v ohybe	50
6.4	Vytavovanie vosku.....	55
6.5	Žihanie a odlievanie	56
6.6	Očisťovanie po odliatí.....	57
6.6.1	Očisťovanie pomocou pneumatického vibračného zariadenia.....	57
6.6.2	Očisťovanie pomocou tryskacieho závesného zariadenia.....	59
	ZÁVER.....	63
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	65
	ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK.....	70

ÚVOD

Forma vyrobená technológiou vytaviteľného modelu pozostáva z jednotlivých vrstiev jemného žiaruvzdorného materiálu a zrnitého žiaruvzdorného materiálu, ktoré sú držané pohromade spojivom. Pri skladaní jednotlivých vrstiev existuje variabilita použitia spojív, plnív aj posypových materiálov. Forma sa vytvára ponorením modelu do keramickej suspenzie obsahujúcej veľmi jemnú keramickú múku a keramické spojivo, ktoré pokryje celú formu. Po každom ponorení sa naniesie vrstva zrnitého keramického posypu. Tento proces ponárania a posypávania sa aplikuje dovtedy, kým forma nebude mať dostatočnú pevnosť, aby odolala namáhaniu, ktoré na ňu pôsobí počas odstraňovania voskového modelu a odlievania kovu. Na odstránenie voskového modelu možno použiť rôzne metódy, zvyčajne parný autokláv, pričom zostane dutá škrupina. Potom sú škrupiny vypálené a naplnené roztaveným kovom, ktorý tuhne vo vnútri. Po odliatí sa keramická škrupina odstráni mechanickými alebo chemickými metódami. [1; 2]

Kľúčové požiadavky na formu pri technológii vytaviteľného modelu zahŕňajú:

1. Dostatočnú pevnosť v surovom stave (nevypálená), aby bez problémov odolala odstraňovaniu vosku;
2. Dostatočnú pevnosť pri vypálení, aby odolala hmotnosti liateho kovu;
3. Vysokú odolnosť proti tepelným šokom, aby sa zabránilo praskaniu počas liatia kovu;
4. Vysokú chemickú stabilitu, aby sa zabránilo interakcii formy a kovu;
5. Dostatočnú priepustnosť formy na zlepšenie prestupu vzduchu cez steny formy počas odlievania kovu;
6. Dostatočnú tepelnú vodivosť na udržanie adekvátneho prenosu tepla cez stenu formy, a s tým spojené chladenie kovu,
7. Nízku tepelnú rozťažnosť na obmedzenie rozmerových zmien v tvare formy a teda v tvare konečného odliatku a
8. Nízku zvyškovú pevnosť na zlepšenie odstraňovania keramického obalu po odliatí. [1]

Táto práca sa zaoberá poslednou kľúčovou požiadavkou na formu pri technológii vytaviteľného modelu – zlepšení jej odstránenia po odliatí. Táto problematika súvisí s mnohými faktormi, ktoré na ňu môžu vplyvať. V prvej časti sú opísané základné spôsoby, ktorými sa odstraňuje keramická škrupina z odliatkov. Použitá metóda odstraňovania môže výrazne ovplyvniť rýchlosť, ale aj cenu operácií spojených s očisťovaním odliatkov. V ďalšej kapitole sú analyzované materiálne a postupové charakteristiky, ktoré môžu mať pozitívny alebo negatívny vplyv na rozpadavosť. Je potrebné zohľadniť mnoho rôznych charakteristík surovín, napr. chemické a fázové zloženie alebo tepelnú rozťažnosť. Tieto vlastnosti určujú správanie sa počas odlievania, vplyv na presnosť rozmerov, priepustnosť škrupiny a mechanickú stabilitu pri odlievaní. V ďalšej kapitole sú opísané skúšky keramickej suspenzie aj hotovej keramickej škrupiny. [3]

1 MOTIVÁCIA A METODIKA RIEŠENIA PROBLÉMU

Technológia vytaviteľného modelu je známa svojou schopnosťou (variabilitou) vytvárať presné tvary odliatkov s vysokou rozmerovou presnosťou a zložitými tvarmi. Veľa výskumníkov rieši problematiku nízkej priedušnosti [4; 5], praskaniu škrupinových foriem počas vytavovania vosku alebo pri liatí roztaveného kovu do vyžihanej škrupiny [1; 6]. Doposiaľ je veľmi málo prác, ktoré by sa však zaoberali odstraňovaním keramickej formy po odliatí, napriek tomu, že sa s touto problematikou zlievarne často stretávajú. [7]

Vo firme MoraviaTech, a.s. majú problémy s rozpadavosťou foriem po odliatí pri odliatkoch so zložitejšou geometriou. Pod pojmom zložitejšia geometria rozumieme odliatky s rôznymi dutinami, slepými dierami, závitmi alebo drážkami, kde sa keramickej obal, vplyvom zmršťovania kovu, pri chladnutí zovrie a nadobudne príliš veľkú pevnosť.

Rozpadavosť škrupinových foriem môže ovplyvniť materiál, z ktorého sú jednotlivé obaly vyrobené. Vzhľadom k tomu, že firma nechcela príliš meniť zaužívané postupy výroby jednotlivých obalov, zmena typu spojiva, plniva alebo žiaruvzdorného posypu, neprichádzala do úvahy. Čistenie odliatkov od keramiky môže ovplyvňovať aj použitá metóda odstraňovania, napríklad namiesto tryskania abrazívami využiť účinnejšiu a produktívnejšiu metódu tryskania vodným lúčom. Takáto modifikácia postupu výroby by bola pre firmu z finančných a priestorových dôvodov tiež neefektívna. Z týchto dôvodov bola cieľom tejto práce snaha modifikovať zloženie keramickej suspenzie, ktorou je tvorená škrupinová forma, a tým uľahčiť jej odstraňovanie po odliatí.

Cieľom tejto práce je rozbor problematiky rozpadavosti keramickej škrupiny po odliatí a návrh optimalizácie pre stávajúcu technológiu výroby. Prvým spôsobom optimalizácie bolo zníženie obsahu tuhých častíc v spojive (binder solids) v primárnej aj sekundárnych vrstvách. Hypotézou tohto návrhu bolo zníženie pevnosti škrupiny, čo by mohlo viesť k lepšej rozpadavosti po odliatí. Ako druhý spôsob bolo modifikovanie nylonovými vláknami, ktoré boli pridané do sekundárnych obalov. Hypotézou týchto skúšok bolo vytvorenie pórov prostredníctvom vyhorenia nylonových vlákien, tým zlepšiť priepustnosť obalu a zvýšiť obsah mikrotrhlín v škrupine, ktoré narušia jej celistvosť, čo by mohlo viesť k jednoduchšiemu odstraňovaniu po odliatí. Tieto modifikované škrupiny sa porovnávali so škrupinami bežne vytvorenými vo firme MoraviaTech a.s.

2 SPÔSOBY ODSTRAŇOVANIA KERAMICKEJ ŠKRUPINY

Po dostatočnom ochladení kovu sa odstraňuje materiál formy, ktorý obklopuje odliatok. Dokončovacie operácie – operácie prevedené po odliatí predstavujú významnú časť, často 40 až 60 % nákladov na výrobu odliatkov [8]. Úplné odstránenie škrupiny sa často skladá z dlhých, špinavých, hlučných a nákladných procesov. Časť materiálu škrupiny môže počas chladnutia opadnúť, ale veľká časť zvyčajne zostáva na odliatku. Tá sa potom odstraňuje mechanicky alebo chemicky, čím vzniknú očistené odliatky, ktoré sa potom mechanicky odrežú z vtokového systému. Jednotlivé metódy na odstraňovanie keramickej škrupiny sú uvedené v nasledujúcich kapitolách. [3; 8]

2.1 Mechanické metódy

Podľa typu zliatiny sa určuje spôsob odstraňovania škrupín po odlievaní. Vo väčšine prípadoch sa keramická škrupina odstraňuje mechanicky. Veľká časť materiálu sa vybija pneumatickým kladivom alebo ručne. Týmto spôsobom sa často nepodarí odstrániť keramika zachytená v otvoroch alebo medzi dielmi. Pre úplné očistenie sa preto používa pieskovanie, tryskanie abrazívami a/alebo tryskanie vysokotlakovým vodným lúčom. [8]

2.1.1 Vytlkanie/ vyrážanie

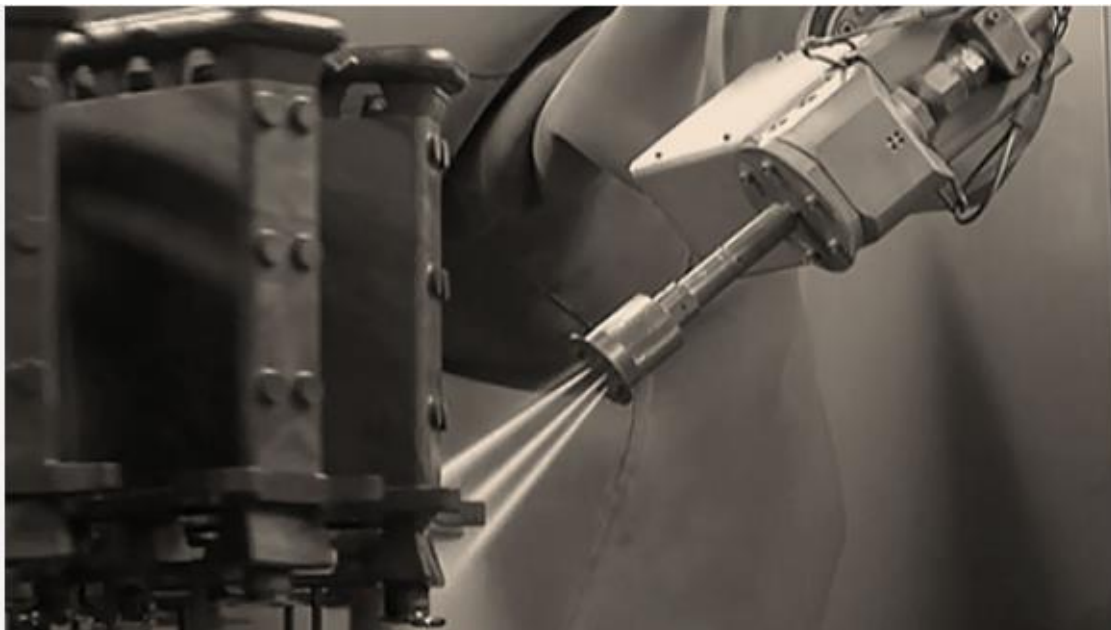
V minulosti sa v malých zlievarňach škrupiny keramických foriem odstraňovali ručne pomocou kladiva. To bolo časovo veľmi náročné a nie veľmi efektívne pri odstraňovaní všetkého materiálu formy. Neskôr bol vynájdený veľmi účinný a menej náročný spôsob – vyrážanie odliatkov pneumatickým vibračným kladivom, ktoré je znázornené na obr. 1. Odliatok obklopený keramickou škrupinou sa upne do zariadenia medzi stacionárnu čeľusť a pohyblivé kladivo. Spustia sa vysokofrekvenčné vibrácie, ktoré uvoľnia a rozbijú škrupinu z odliatku. Táto operácia považuje za najviac hlučnú a prašnú v tejto technológii. Vibračné kladivo je preto umiestnené do zvukotesnej a prachotesnej kabíny, vďaka ktorej je odstraňovanie škrupiny týmto spôsobom bezpečnejšie. Zo zložitejších odliatkov, ktoré majú priechodné alebo slepé diery, sa neodstráni všetka škrupina, preto je nutné po prvotnom ovibrovaní použiť ďalšie ošišťovacie zariadenie. [9; 10]



Obr. 1 Pneumatické vibračné kladivo.

2.1.2 Tryskanie vysokotlakovým vodným lúčom

Očisťovanie odliatkov pomocou vysokotlakového vodného lúča (obr. 2) patrí medzi najúčinnějšíe procesy čistenia. Na začiatku sa keramická škrupina rozpadne na veľké kusy a ku koncu cyklu až na zrnitý, piesku podobný materiál. V priebehu niekoľkých sekúnd sa zo zostavy odliatkov odstráni až 90% keramického materiálu. Po očistení vodným lúčom je stromček s odliatkami pripravený na rezanie. Výhodou je eliminácia mechanického poškodenia a odlomenia častí odliatku, vďaka tomu, že vznikajú menšie napätia. Na rozdiel od pieskovania a otryskávania abrazívami, pri očisťovaní vodou nevzniká prach oxidu kremičitého a iných látok. Z toho vyplýva, že táto metóda odstraňovania keramických škrupín zvyšuje produktivitu, uľahčuje operátorovi prácu a poskytuje tichšie prostredie závodu. Kombináciou čistenia a orezávania odliatkov z vtokovej sústavy do jedného stroja znižuje náklady a priestor zlievarne. [11; 12]



Obr. 2 Tryskanie vodným lúčom [12].

2.1.3 Tryskanie abrazívami

Rôznymi typmi abrazíva sa môže doceliť odlišný stupeň odstránenia škrupiny. Bežne sa používajú oceľové alebo železné broky. Sú dostupné dva základné tvary brokov, ktoré sa dodávajú v rôznych veľkostiach. Guľaté broky (obr. 3) sú najpoužívanejšie pri procese čistenia odliatkov. Sú vyrobené odlievaním do foriem. Vďaka svojmu tvaru zanechávajú povrch odliatku hladký, ale doba obrusovania je dlhšia ako pri ostrohranných. Ostrohranné broky (obr. 4) sa vyrábajú sekaním/ peletovaním drôtov. Vďaka svojim ostrým hranám síce rýchlejšie čistia, ale za účelom častého poškodenia finálneho povrchu. Broky z rezaného drôtu majú dlhšiu životnosť ako odlievané. Menšie oceľové broky budú mať za následok hladší povrch za dlhší čas, väčšie naopak obrúsia prebytočnú keramiku skôr, ale dochádza k poškodzovaniu kvality povrchu. Ďalšími materiálmi na tryskanie môžu byť napríklad kremičitý alebo hlinitý piesok. Tryskanie týmito materiálmi sa tiež nazýva pieskovanie. [13; 14; 15]

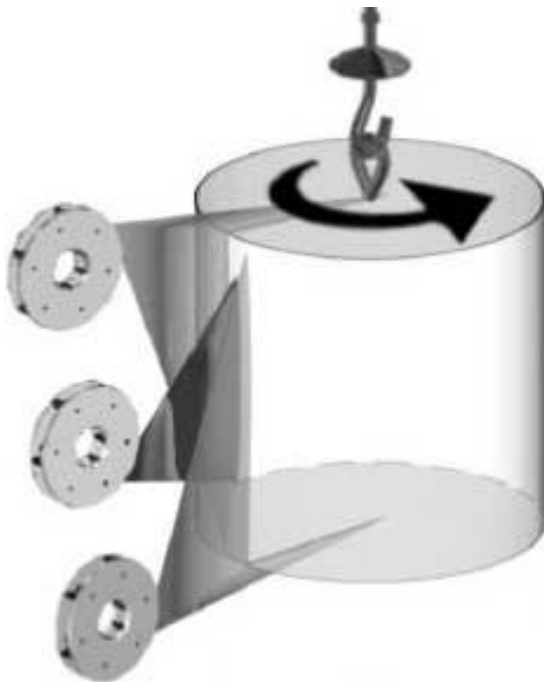


Obr. 3 Guľaté broky [13].



Obr. 4 Ostrohranné broky [14].

- **Závesné tryskacie zariadenie** (obr. 5) pracuje na princípe otryskania dielov zavesených na rotujúcom a súčasne vodorovne (priamočiario) sa pohybujúcom závesnom háku. Na tomto háku je zavesený takzvaný stromček, na ktorý sa zavesí väčšie množstvo dielov, aby sa maximálne využil vnútorný tryskací priestor zariadenia. Broky sú do kabíny vrhané pomocou metacích kôl umiestnených z bočnej strany steny tak, aby zasahovali dielce určené k otryskávaniu čo najúčinnejšie. Čas do úplného otryskania odliatkov vo vnútri zariadenia závisí od pootočenia odliatku na závese, od pohybu vo vnútri kabíny ale aj od typu použitých brokov. [16]



Obr. 5 Závesné tryskacie zariadenie [16].

- **Bubnové tryskacie zariadenie** (obr. 6) pracuje na princípe tryskania dielov voľne vložených na pohybujúci sa nekonečný pás. Odliatky odrezané od vtokovej sústavy sú vo vnútri zariadenia otáčané a premiešavané. Počas celého procesu sú do vnútra zariadenia vháňané oceľové broky pomocou metacích kolies umiestnených na hornej sčasti stroja. Počas celej doby otryskávania sa odliatky omieľajú o seba, čo tiež prispieva k rýchlejšiemu odstraňovaniu keramiky. Súčasným pôsobením tryskania a miešania sa docieľuje rýchle, rovnomerné a dokonalé očistenie konečných odliatkov. [17]



Obr. 6 Bubnové tryskacie zariadenie [17].

2.2 Chemické metódy

K odstráneniu keramickej škrupiny sa používa tiež chemické lúhovanie. Pre odstraňovanie kremenných žiaruvzdorných materiálov sa používa kyselina fluorovodíková. Avšak najčastejšie sa používa chemické čistenie využívajúce žieravé soli alebo soli v roztavenej forme ako vodný roztok. Z hľadiska efektivity sa táto metóda používa až po prvotnom odstránení keramickej škrupiny, napríklad na pneumatickom kladive alebo po otryskaní, ale je možné ňou odstrániť celú keramicú škrupinu. Tento prístup sa postupne vyraduje z dôvodu ochrany životného prostredia a zdravia. [9; 18]

2.2.1 Kúpeľ s rozpustenou soľou

Rozpustená soľ je hydroxid sodný s pridanými aditívami, alebo bez nich. Princíp spočíva v rozpustení soli v ocelej vani pri teplotách 475 – 600 °C. Odliatky sú v tomto kúpeli ponorené približne na 20 minút. Roztavená soľ počas tejto krátkej doby dostatočne odstráni zvyšky žiaruvzdorných materiálov na báze oxidu kremičitého z povrchu odliatku. Nadmerná doba alebo príliš vysoká teplota kúpeľu nezvyšuje rýchlosť a efektívnosť odstraňovania škrupiny, avšak môže dochádzať k vzniku medzikryštálovej korózie u širokej škály zliatin. Po očistení v soľnom kúpeli sa musia odliatky dôkladne opláchnuť, aby sa odstránil prebytok soli. Potom sú odliatky vložené do neutralizačnej kyseliny. Čistenie v kúpeli s roztavenou soľou je rýchle a účinné pri odstraňovaní žiaruvzdorných materiálov použitých pri výrobe keramickej škrupiny pre technológiu vytaviteľného modelu. [9;18]

2.2.2 Horúca vodná žieravá kúpeľ

Na odstránenie zbytkového žiaruvzdorného materiálu sa používajú tieto kúpele s obsahom 5-30 % hydroxidu draselného. Pri teplote približne 80°C sú odliatky ponorené do roztoku na niekoľko hodín. Ak je kúpeľ čerstvá, rozpúšťanie keramiky trvá asi 30 min. Ak je nasýtená čiastočnou keramikou, rozpúšťanie môže trvať až 2 hodiny. Po vylúhovaní sa odliatky dôkladne opláchnu v horúcej vode a vysušia. [9; 19]

2.2.3 Kúpeľ v kyseline fluorovodíkovej

Odstránenie keramického obalu z odliatku spočíva v ponorení škrupinovej formy do kúpeľa koncentrovanej kyseliny fluorovodíkovej s obsahom 48 – 70 % po dobu približne 15 až 30 minút. Roztok sa na rozdiel od predchádzajúcich kúpeľov nemusí zahrievať. Po ponorení obalených odliatkov sa kremičité spojivo rozpustí. Vďaka tomu sa materiál škrupinovej formy ľahko drobí a oddeľuje od kovového odliatku bez ďalšieho mechanického odstraňovania. Po kúpeli v kyseline sa odliatok opláchnu v studenej vode a tým sa odstráni rozpadajúca sa keramická škrupina. Ak sa po ponorení nedostatočne odstráni keramika, proces ponorenia do kyseliny sa zopakuje. [20]

3 VPLYVY NA ROZPADAVOSŤ

Existuje mnoho faktorov, ako je typ a množstvo oxidu kremičitého, typ žiaruvzdorného materiálu, distribúcia veľkosti častíc múky, obsah pevných látok, viskozita atď., ktoré zohrávajú úlohu pri konečných vlastnostiach keramického obalu. Kvalita keramických škrupín závisí od materiálov, ako aj od procesu, ktorým sa vyrábajú. Keramické formy s veľmi nízkou pevnosťou v surovom stave sú náchylné na praskanie pri odstraňovaní vosku. Suroviny ako je spojivo, plnivo, zmáčadlo a odpeňovač, používané na výrobu suspenzie a posypový materiál hrajú hlavnú úlohu pri určovaní celkových konečných vlastností keramickej škrupiny. [2; 21]

Vhodnou voľbou keramických materiálov možno dosiahnuť hladkú povrchovú úpravu a vysokú presnosť kovových odliatkov. Výber akéhokoľvek žiaruvzdorného výplňového materiálu na výrobu škrupín závisí od širokej škály faktorov, ktoré môžu ovplyvniť konečné vlastnosti odliatkov. [21]

Medzi typické zložky suspenzie v technológii vytaviteľného modelu, ktoré zohrávajú dôležitú úlohu pri tvorbe jednotlivých obalov, patria: koloidný oxid kremičitý (spojivo), voda a/alebo polyméry, zmáčadlá, protipenivé činidlá a žiaruvzdorné múčky (plnivo). Taktiež výsledné vlastnosti keramickej škrupiny ako je priepustnosť plynov a správanie sa pri konečnom odstraňovaní, závisia aj na vhodnej voľbe žiaruvzdorných posypov. [22]

3.1 Materiál

Veľkosť a tvar pevných látok v koloidnom kremíku sa u jednotlivých výrobcov líši, rovnako ako výber patentovaných prísad, ako sú protipenivé činidlá a zmáčadlá. Hmotnostný pomer medzi múkou a spojivom, ako aj riedenie spojiva je v jednotlivých zlievarňach tiež rozdielny. Bolo zverejnených málo výskumných prác, ktoré by sa zaoberali voľbou optimálnych pomerov jednotlivých materiálov. Keramické materiály si vyžadujú dôkladnú znalosť tvarov, rozdelenia veľkosti a kyslosti častíc múky a spojiva, ako aj kompletného zloženia spojiva. [2; 23]

Priemysel používa veľmi veľa typov ľahko dostupných žiaruvzdorných materiálov, ktoré zodpovedajú individuálnym potrebám a preferenciám danej zlievarne. Žiaruvzdornosť je len jednou z požadovaných vlastností na výrobu foriem pri technológii vytaviteľného modelu. Žiaruvzdornosť materiálu je schopnosť látky odolávať vysokým teplotám bez tavenia alebo rozkladu. [2]

Každá zlievaňa používa iné typy suspenzií a posypových materiálov, a každý z nich ovplyvňuje fyzikálne vlastnosti formy iným spôsobom. Určenie rovnakej prevádzkovej viskozity pre všetky zlievarne nie je možné, pretože sa mení v závislosti od použitých materiálov a od toho, čo každá zlievaňa považuje za vhodné pre svoju prevádzku. Vyššia viskozita základnej suspenzie poskytuje inú hrúbku povlaku ako sekundárna suspenzia s nižšou viskozitou. Používanie posypových materiálov sa v jednotlivých zlievarňach tiež líši. Rozdielna veľkosť častíc a typ posypového materiálu môže viesť k (rozdielnym štruktúram vo vrstvách foriem) rôznym štruktúram vrstiev vo forme. [2]

3.1.1 Spojivá

Spojivo použité na vytvorenie keramickej suspenzie zohráva dôležitú úlohu pri kvalite vyrobeného odliatku. Spojivo pri technológii vytaviteľného modelu je adhezívna tekutá žiaruvzdorná fáza, ktorá sa používa na vytvorenie keramickej väzby medzi žiaruvzdornými časticami. Typ použitého spojiva závisí od mnohých faktorov, ako sú: veľkosť odliatku, teplota vypaľovania a predhrievania formy, spôsob tvorby formy a povaha odlievaného kovu. Prevažne sa používajú kremičité soli na báze vody, ale občas sa používajú aj etylsilikáty na báze alkoholu. [9; 24]

- a) Etylkremičitany - Spojivá na bázi alkoholu schnú oveľa rýchlejšie ako spojivá na báze vody, čo urýchľuje tvorbu škrupiny, pretože ďalšie obaly sa môžu vytvárať už behom niekoľkých minút. Ako spojivá sa obvykle používajú koncentrované formy obsahujúce približne 40 hm% oxidu kremičitého. Etylkremičitany nemajú samé o sebe žiadne väzobné vlastnosti, preto sa musia chemicky rozložiť, čo sa dosiahne reakciou s vodou. Touto reakciou vzniká alkohol a oxid kremičitý v aktívnom stave. Koloid má oveľa menšiu veľkosť častíc ako koloidy na báze vody. Hydrolyzované spojivo je pomerne stabilné v rozsahu pH 1,7 až 2,2 a najmenej stabilné pri pH 5. Súdržná gélová štruktúra sa vytvorí, keď sa do zmesi silikátov pridá kyslý alebo zásaditý katalyzátor (napríklad amoniak). Používanie tohto spojiva však rýchlo klesá, pretože je oveľa drahšie a predstavuje nebezpečenstvo požiaru a ohrozuje životné prostredie. [8; 9; 24]
- b) Silikátové soli (koloidné roztoky oxidu kremičitého) - pozostávajú z častíc oxidu kremičitého (s priemerom 4 - 100 nm), ktoré sa zvyčajne nachádzajú v alkalickom vodnom roztoku. Obsah oxidu kremičitého môže byť až 50 hm%, hoci bežnejšie používané sú 30 %-tné roztoky. Roztok sa mení na gél úpravou pH z alkalického na kyslé, zavedením kladne nabitých iónov alebo sušením na vzduchu, až kým nie je koncentrácia roztoku dostatočne vysoká na to, aby sa jednotlivé častice oxidu kremičitého zrazili a spojili. Koloidný oxid kremičitý sa používa najčastejšie. Jeho hlavnou nevýhodou je, že vďaka svojej vodnej báze pomaly schne, najmä v neprístupných otvoroch alebo dierach. Pomalé schnutie má aj výhodu – dostatok času na manipuláciu, aby sa zaistil hladký a rovnomerný obal a celkové pokrytie vo fáze nanášania posypu. [9; 24]

Zvyčajne existujú dva druhy koloidného oxidu kremičitého používané v technológii vytaviteľného modelu. Jeden druh má priemernú veľkosť častíc 8 nm, ktoré sú klasifikované ako malé častice, zatiaľ čo druhá trieda má priemernú veľkosť častíc 12 nm a sú klasifikované ako veľké častice. Koloidný oxid kremičitý s veľkými časticami sa považuje za vhodnejší na primárne vrstvy, kvôli menšiemu povrchu a z toho vyplývajúcej nižšej reaktivity a dlhšej životnosti suspenzie. [8; 22]

3.1.2 Žiaruvzdorné materiály

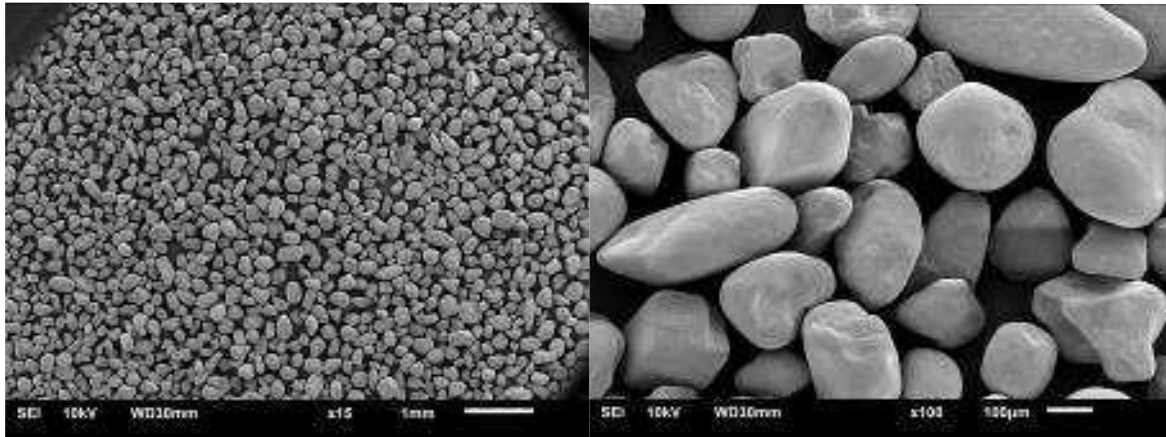
Bežne používané žiaruvzdorné materiály pre tvorbu keramickej škrupiny v technológii vytaviteľného modelu sú napríklad zirkón, kremík, oxid hlinitý a rôzne aluminosilikáty. Cena oxidu hlinitého je príliš vysoká na bežné použitie, ale využíva sa hlavne v procese usmerného tuhnutia. Zirkón, grafit a ytrium sa používajú pri odlievaní reaktívnych zliatin. V nasledujúcej časti sú rozobrané základné používané materiály. [8]

ZIRKÓN ($ZrSiO_4$)

Kremičitan zirkoničitý alebo zirkón (67% ZrO) je prirodzene sa vyskytujúci žiaruvzdorný materiál, v prírode sa objavuje vo forme jemného piesku. Zirkón má vysokú špecifickú hmotnosť v rozmedzí 4,6 - 4,7 g.cm⁻³. Ako je znázornené na obr. 7, zrná zirkónového piesku sa vyznačujú ideálne guľatým tvarom takmer so zhodnou veľkosťou a čistým povrchom. Jeho jemnozrnná štruktúra poskytuje vynikajúcu povrchovú úpravu, okrúhly tvar a vysoká hustota zlepšuje tekutosť, vďaka tomu poskytuje jednotné pokrytie zostavy. [25; 26; 27]

Zirkón sa vo všeobecnosti využíva iba do primárnych vrstiev, pretože sa v prírode nevyskytuje vo väčšej zrnitosti vhodnejšej do sekundárnych (záložných) vrstiev. Ako plnivo do primárnej suspenzie sa zirkónová múčka používa hlavne z dôvodu vysokej tepelnej vodivosti a stability pri vysokých teplotách. Taktiež má dobrý chladiaci účinok a eliminuje reakcie medzi škrupinou a roztaveným kovom. Múčka sa vyrába mletím piesku na presne kontrolovanú veľkosť častíc.

Bežne je dostupná o jemnosti 150-325 mesh (jednotka mesh = počet ôk sita na dĺžke jedného palca). [8; 9; 25]



Obr. 7 Zirkón [26].

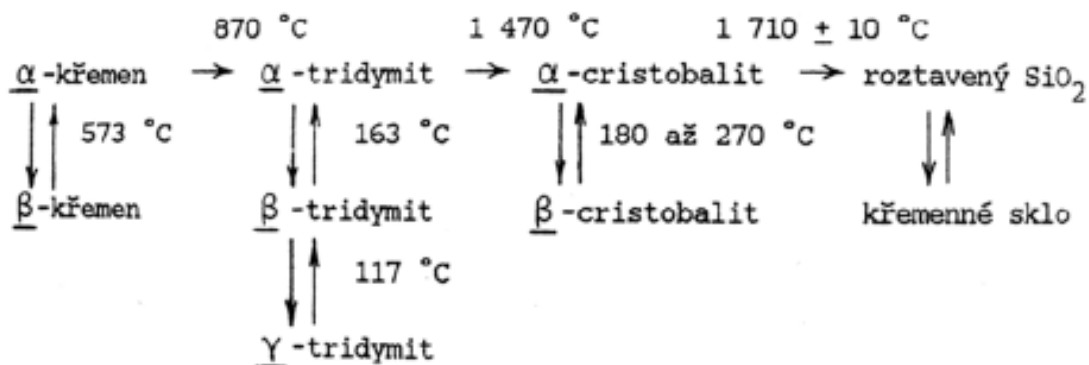
OXID KREMIČITÝ (SiO_2)

Kryštalický oxid kremičitý patrí medzi najekonomickejšie ostrivo. V minulosti sa považovalo za najrozšírenejšie, ale v súčasnosti sa nahradzuje novými typmi. Kremenné piesky sa radia medzi ostrivá kyslého charakteru a hlavným minerálom je, ako už napovedá sám názov, kremeň. Je to prirodzene najrozšírenejší minerál vyskytujúci sa v prírode. Teplota tavenia kremeňa je nad $1700\text{ }^\circ\text{C}$ a merná hmotnosť v rozmedzí $2,62\text{-}2,66\text{ g.cm}^{-3}$. [28; 29]

Kryštalický oxid kremičitý má veľmi vysoké hodnoty tepelnej rozťažnosti vzhľadom na to, že existuje v niekoľkých rôznych alotropických formách. Rozoznávajú sa tri rôzne kryštalické formy: kremeň, tridymit a cristobalit. Počas zahrievania alebo ochladzovania dochádza k premenám medzi týmito kryštalickými formami (zahŕňajúcim zmeny štruktúry). Tieto zmeny tvoria expanziu alebo kontrakciu v dôsledku molekulárnych prestavieb. [24]

Kremeň pri zahrievaní prechádza rôznymi modifikačnými zmenami a s tým sú spojené aj objemové zmeny. Oxid kremičitý poznáme v modifikáciách α – kremeň, β – kremeň, α – cristobalit, β – cristobalit, α – tridymit, β – tridymit, γ – tridymit a kremenné sklo. Jeho najbežnejšia forma je β – kremeň. Modifikačné premeny prebiehajú podľa stupňa zahrievania znázornených na obr. 8. Vodorovné šípky znázorňujú nevratné premeny, ktoré prebiehajú pozvoľne pri daných podmienkach, zatiaľ čo zvislé šípky znázorňujú prebiehajúce pri rýchlom ohreve alebo ochladzovaní. Pri rýchlej premene z β – kremeňa na α – kremeň dochádza k zmene mriežky z triagonálnej trapezoedrickej na hexagonálnu, čo spôsobí zmenu objemu približne o 2,58 až 3,9 %. Pri pomalej premene z α – kremeňa na α – cristobalit dochádza k zmene mriežky z hexagonálnej na kubickú a tým k expanzivnému rastu objemu približne o 15 %. Používanie kryštalického oxidu kremičitého sa začalo znižovať a priemysel uprednostnil používanie taveného oxidu kremičitého. Pre lepšiu prehľadnosť objemových zmien sú zhrnuté v tab.1. [28; 29; 30]

Väčšina škrupín obsahuje značné množstvo oxidu kremičitého. Pri teplotách nad $1000\text{ }^\circ\text{C}$ amorfný oxid kremičitý kryštalizuje a vytvára beta cristobalit. Fázový prechod cristobalitu znižuje vypálenú pevnosť oxidu kremičitého. Keramické škrupiny na báze oxidu kremičitého však môžeme v kľude použiť na odliatky z hliníka a horčíka, pretože zvyčajne majú teploty tavenia a liatia, ktoré sú nedostatočné na podporu tvorby cristobalitu. Škrupiny však zostávajú po vypálení neprimerane pevné a je ťažké ich odstrániť z odliatkov. [3]



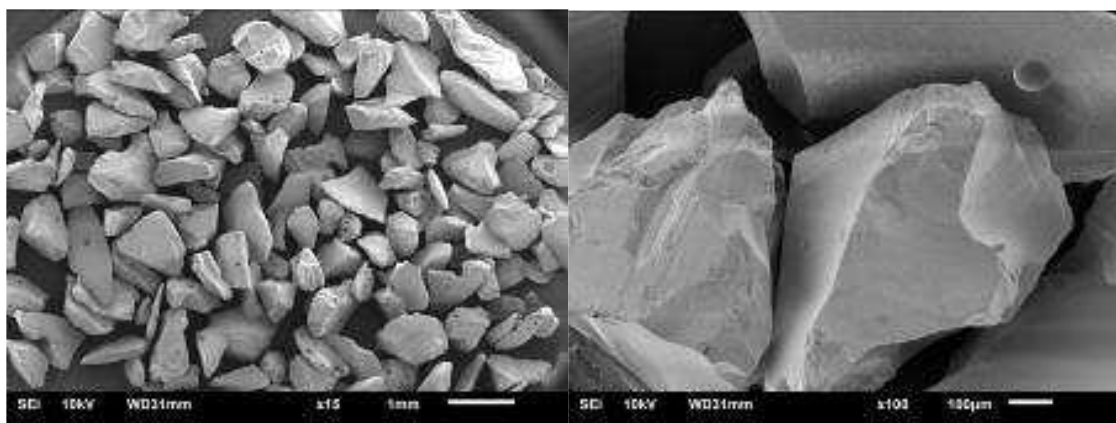
Obr. 8 Modifikačné premeny kremeňa [29].

Tab. 1 Objemové zmeny kremeňa pri rôznych teplotách.

premena	teplota premeny [°C]	objemová zmena [%]
β - kremeň \rightarrow α -kremeň	573	0,86 - 1
γ -tridymit \rightarrow α - tridymit	117 - 163	0,4 - 1,5
β - cristobalit \rightarrow α - cristobalit	240 - 270	2,7 - 3,0
α - kremeň \rightarrow α -tridymit	870	14,4 - 16,0
α - kremeň \rightarrow α -cristobalit	1025 - 1300	15,4 - 17,4

Tavený (sklovitý) oxid kremeň vzniká zahriatím kremeňa, cristobalitu alebo tridymitu nad 710 °C (bod tavenia) a následným prudkým ochladením. Jednotlivé tetraédre oxidu kremeňového sa nemôžu usporiadať v určitom poradí a spájajú sa náhodným spôsobom a vytvárajú amorfné sklo. Keďže v dôsledku amorfnej štruktúry nedochádza k žiadnym štruktúrnym fázovým zmenám a lineárna tepelná rozťažnosť je nízka, tavený oxid kremeňový má veľmi nízky koeficient tepelnej rozťažnosti $0,56 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (0,05 % medzi 20 a 1 000 °C), a teda väčšiu tepelnú stabilitu ako kryštalické formy. [24]

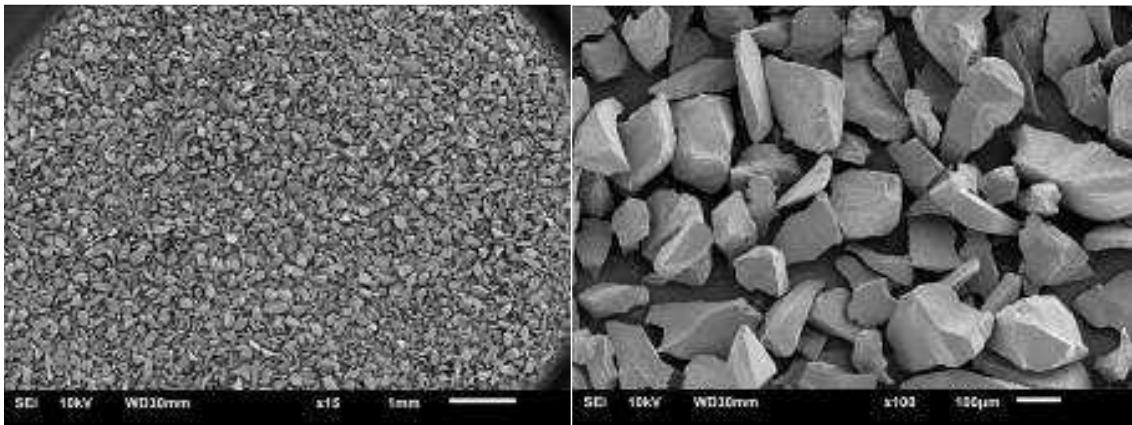
Tavený oxid kremeňový (obr. 9) je zložkou s najnižšou špecifickou hmotnosťou spomedzi všetkých surovín ($2,1908 \text{ g.cm}^{-3}$). Je obzvlášť vhodný ako posypový žiaruvzdorný materiál, pretože jeho tepelná rozťažnosť je menej ako polovičná v porovnaní s rozťažnosťou oxidu hlinitého pri 2 000 °C. Tavený oxid kremeňový má nižšiu hustotu, poskytuje asi o 23 % väčší objem na jednotku hmotnosti, čo tiež uľahčuje odstraňovanie ľahších škrupín po odlievaní pri vyradovacích a čistiacich operáciách. [23]



Obr. 9 Tavený oxid kremeňový [26].

OXID HLINITÝ

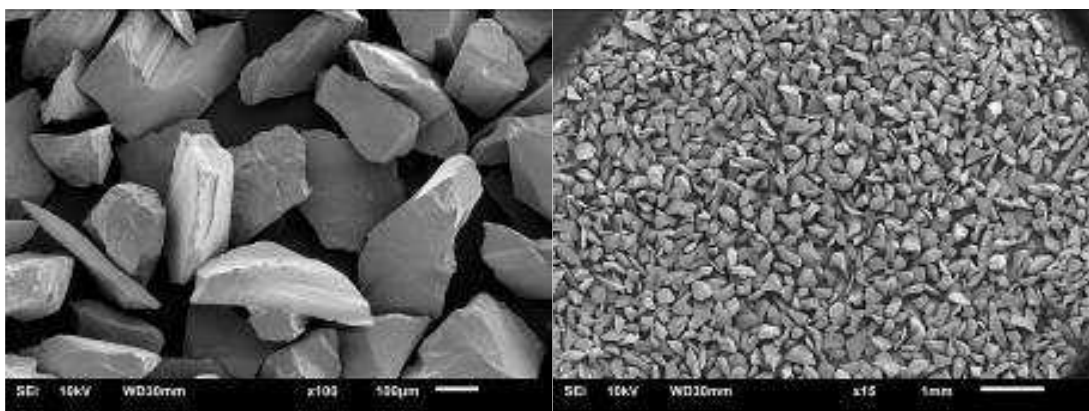
Tavený oxid hlinitý sa čoraz častejšie používa ako žiaruvzdorná múčka v primárnej vrstve formy, najmä ako alternatíva k zirkónu v oceliarskom priemysle alebo pri výrobe odliatok zo superlegovaných materiálov. Výhody taveného oxidu hlinitého súvisia najmä s vysokou žiaruvzdornosťou v spojení s vysokou čistotou a nízkou pórovitosťou, čo vedie k tomu, že primárna vrstva formy je mimoriadne stabilná bez ohľadu na teplotu odlievania. Jedným z kľúčových prvkov v tomto spojení je aj reakcia so SiO_2 v spojive na stabilnejšiu fázu počas výpalu. V dôsledku toho zavedenie taveného oxidu hlinitého výrazne znižuje reakciu kovovej formy a eliminuje povrchové defekty, ktoré sú výsledkom nečistôt, ktoré sú vždy spojené so zirkónom (kalcinovaným alebo nekalcinovaným). Úpravou pôvodného taveného oxidu hlinitého by sa mohli jeho vlastnosti ďalej zlepšiť, najmä pokiaľ ide o odstraňovanie škrupín a čistenie dielov. [7]



Obr. 10 Tavený oxid hlinitý [26].

MULLIT

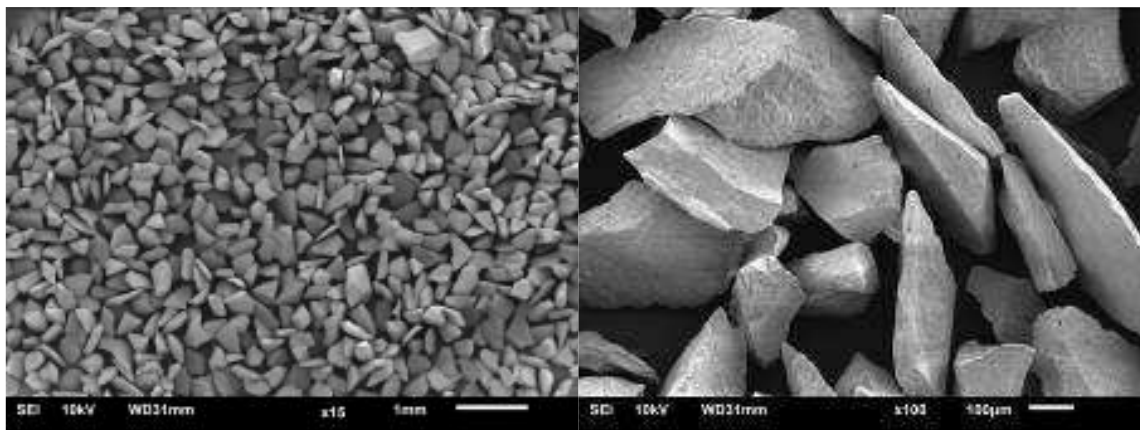
Mullit ($76\% \text{Al}_2\text{O}_3$) vzniká roztavením a kryštalizáciou oxidu kremičitého a oxidu hlinitého. Používa sa vo väčšom množstve v zložení keramického obalu, ako múčka, ale aj ako posypový materiál, vďaka svojej vysokej teplote tavenia, odolnosti voči vysokým teplotám, vysokej lámavosti a dobrej tepelnej a chemickej stabilite. Vyznačuje sa nízkou hustotou ($3,17 \text{ g.cm}^{-3}$), nízkou tepelnou vodivosťou, nízkou tepelnou rozťažnosťou. Mullit má o niečo vyššiu lámavosť ako oxid kremičitý a pri nadbytku oxidu hlinitého sa lámavosť ešte zvyšuje. [23; 24]



Obr. 11 Mullit [26].

MOLOCHIT

Molochit ($42\% \text{Al}_2\text{O}_3$) patří do skupiny hlinitokremičitanov. Vyrába sa kalcináciou z kaolínov obsahujúcich malý obsah železa a vysoký obsah oxidu hlinitého, pri teplote okolo 1500°C približne 24 hodín. Kalcináciou sa prevedú ílové minerály na zmes mullitu a amorfného kremenného skla. Na obr. 12 sú znázornené ploché zrná molochitu s drsným povrchom. V technológii vytaviteľného modelu sa používa ako múčka ale aj ako posypový materiál v širokej škále veľkosti zrn. Vyznačuje sa pomerne vysokou žiaruvzdornosťou ($1750 - 1770^\circ\text{C}$), pomerne nízkou mernou hmotnosťou ($2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) výbornou odolnosť voči tepelným šokom vďaka jednotnej tepelnej rozťažnosti. [26; 29]



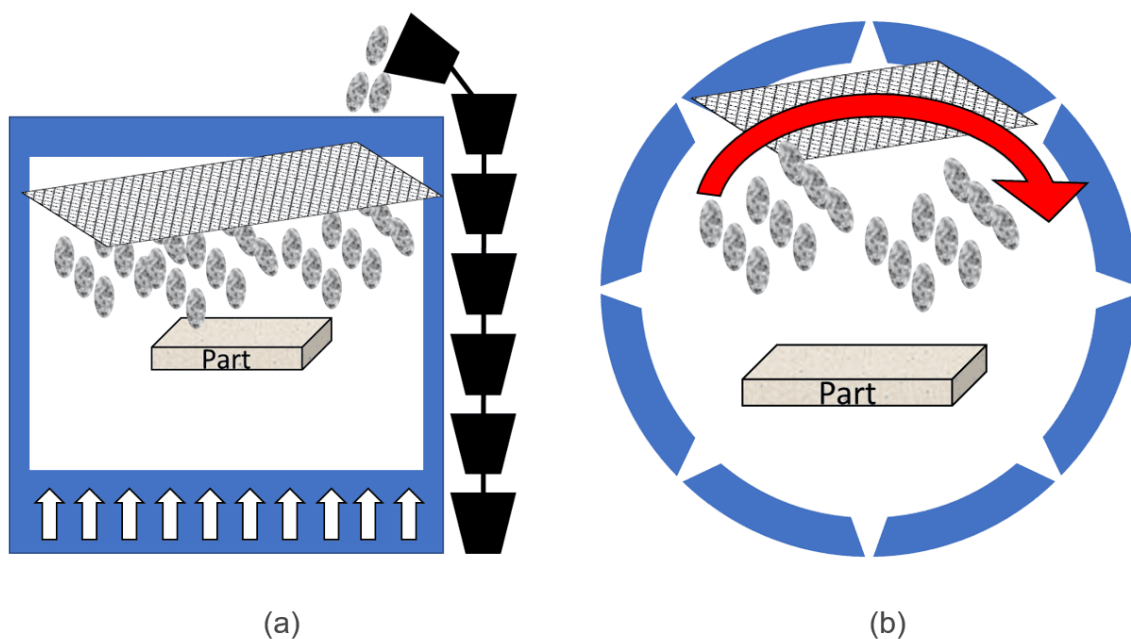
Obr. 12 Molochit [26].

3.3 Metódy nanášania posypu

Po namočení voskového modelu sa na povrch aplikuje hrubý keramický posyp, obvykle pomocou jednoduchého stroja tak, aby sa zaistilo čo najrovnomernejšie pokrytie celého povrchu modelu. Posypový materiál sa pri technológii vytaviteľného modelu nanáša dvomi hlavnými technikami/ metódami : gravitačným posypom alebo fluidizáciou. [9; 31]

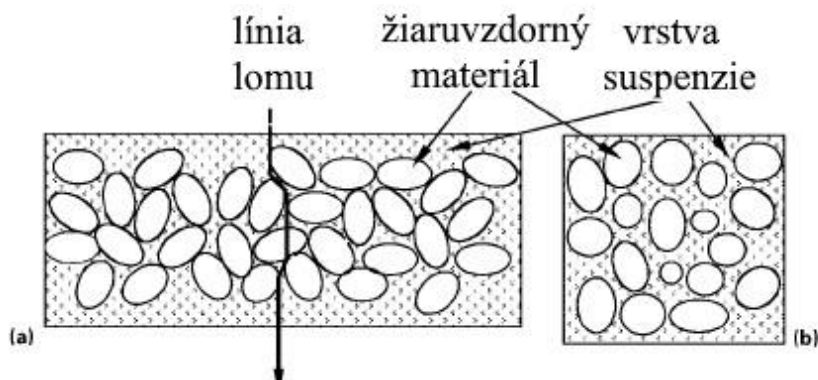
3.3.1 Gravitačný posyp

Gravitačný posyp spočíva v tom, že stroj vytvára rovnomerný pieskový dážď, ktorý sa zachytáva na mokrú keramickú suspenziu. Počas celého nanášania žiaruvzdorného keramického posypu je nutné vykonávať rotačné a priečne pohyby na získanie kvalitného obalu. V priemysle sa používajú dve varianty – vertikálny a rotačný gravitačný posyp (obr. 13). [9; 31]



Obr. 13 Gravitačný posyp (a) vertikálny, (b) rotačný [32].

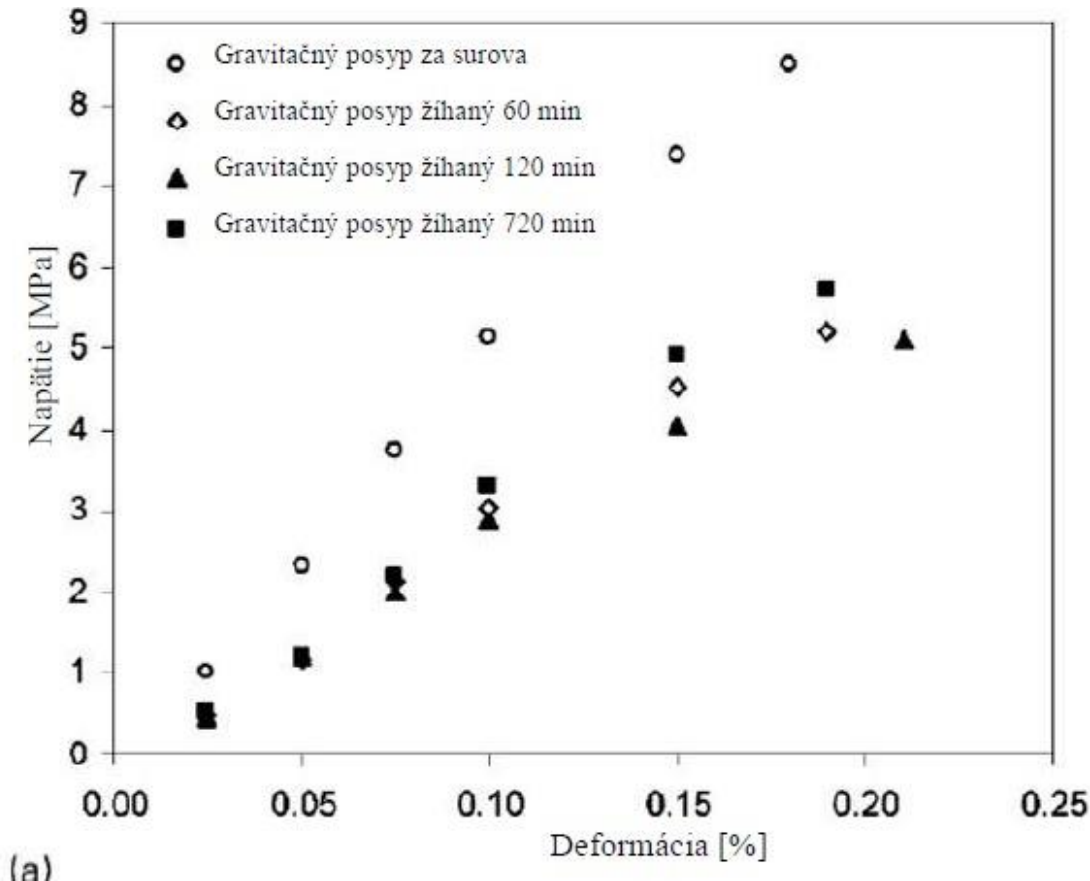
Pri tejto posypovej metóde sú častice usporiadané náhodne ako je znázornené na obr. 14, tiež je viditeľné, že škrupina vytvorená gravitačným posypom podlieha menšiemu vychýleniu v smere kolmom na povrch v porovnaní so štruktúrou vytvorenou pomocou fluidného posypu. To má za následok relatívne väčší podiel lomov okolo posypových častíc na výslednom povrchu trhliny v porovnaní s tým, čo vykazovali vzorky vytvorené fluidným posypom, čo vedie k relatívne klasickejšiemu krehkému správaniu a mierne vyššej pevnosti. [31]



Obr. 14 Uloženie častíc pri gravitačnom posype a) zo strany, b) na povrch lomu [31].

Hrúbka obalov vytvoreného gravitačným posypom je tenšia, čo súvisí s rýchlosťou nanášania častíc. Častice, ktoré majú väčšiu kinetickú energiu, sa vryjú hlbšie do vrstvy suspenzie, čo vedie k vytvoreniu tenšieho obalu. Z toho vyplýva, že pri znížení rýchlosti nanášania posypového materiálu sa zvýši hrúbka škrupiny. [31]

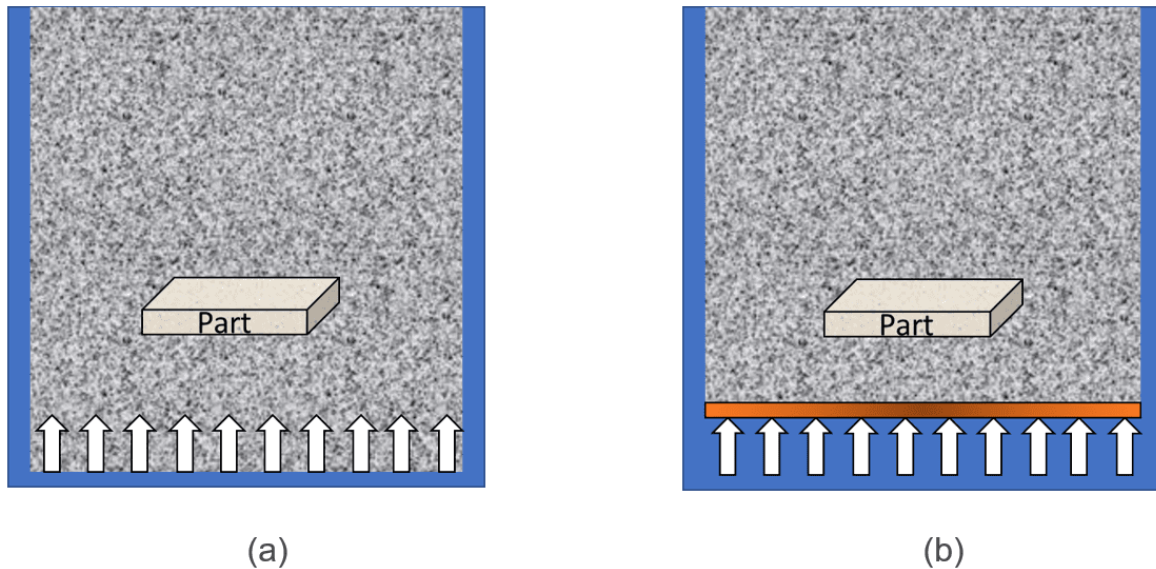
Na škrupine vytvorenej gravitačným posypom boli v štúdiu [31] vykonané pevnostné skúšky za rôznych stavov – za surova a pri vyžihaní pri rôznych časových výdržiach. Z obr. 15 vyplýva, že škrupina dosahovala najvyššiu pevnosť v surovom stave. Po vyžihaní došlo k zníženiu pevností v dôsledku vyhorenia polymérov. [31]



Obr. 15 Graf závislosti napätia na defomácii škrupiny vytvorenej gravitačným posypom [31].

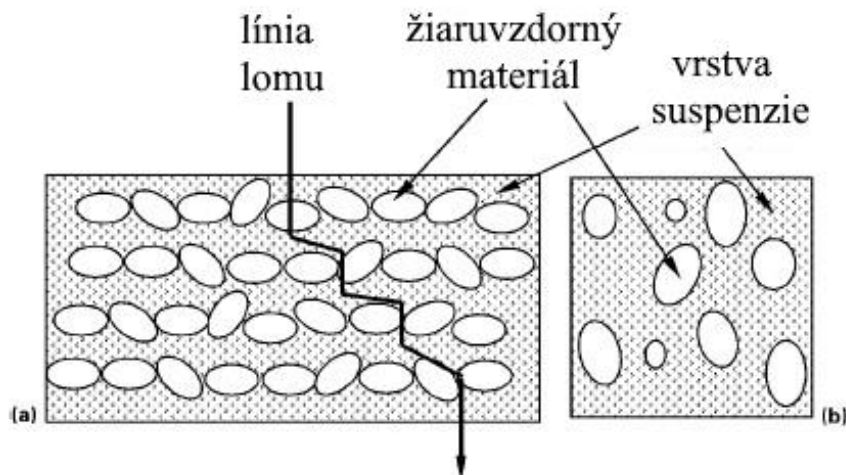
3.3.2 Fluidný posyp

Fluidný posyp znázornený na obr. 16 spočíva v ponorení namočeného voskového stromčeka v suspenzii do rozfúkaného posypového materiálu. Pri fluidnom posype sa častice správajú ako vriaca kvapalina v dôsledku pôsobenia tlakového vzduchu prechádzajúceho cez poréznu dosku v spodnej časti zariadenia. Táto metóda sa väčšinou používa na spevňujúce obaly. Ako bolo spomenuté v predchádzajúcej kapitole, hrúbka škrupiny na plochých častiach, ale aj na hranách bola väčšia ako pri dažďovom posype. Tiež sa používajú dve alternatívy – (a) tryskové fluidné lože (b) vŕhanie vzduchu cez poréznu tvárnicu [32; 8]



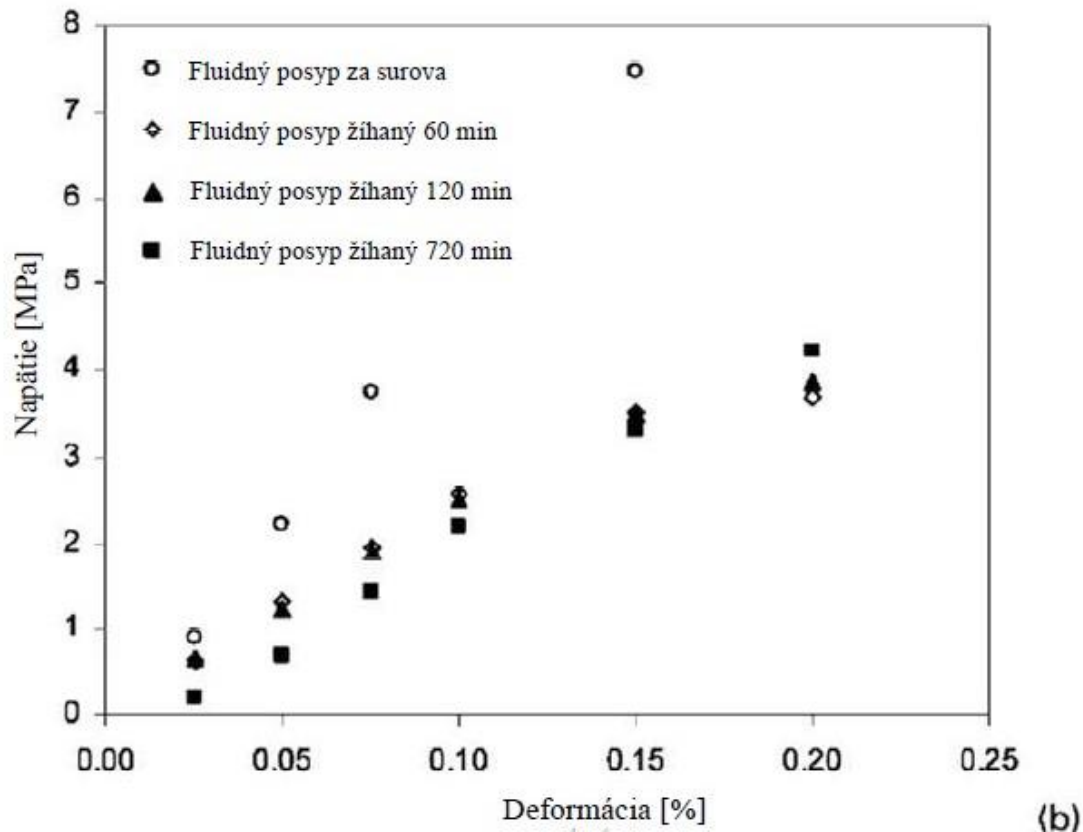
Obr. 16 Fluidný posyp [32].

Pri vytváraní škrupiny technikou fluidného posypu sú častice materiálu unášané prostredníctvom stlačeného vzduchu. To vedie k aplikácii žiaruvzdorných častíc orientovaných relatívne rovnobežne s povrchom vosku. Tým sa vytvára štruktúra s oddelenými vrstvami medzi suspenziou a posypom. Schéma uloženia častíc posypu je znázornená na obr. 17. Potom, čo je lomová trhlinka iniciovaná kolmo na povrchovú vrstvu, zmení smer a šíri sa pozdĺž oslabenej vrstvy suspenzie predtým, ako prenikne do ďalšej posypovej vrstvy. Výsledná lomová plocha obsahuje väčší podiel trhlín cez slabú vrstvu suspenzie. [31]



Obr. 17 Uloženie častíc pri fluidnom posype a) zo strany, b) na povrch lomu [31].

V štúdií [31] boli pevnostné skúšky prevedené aj na škrupine vytvorenej pomocou fluidného posypu. Pevnosť za surova (obr. 18) pri oboch metódach posypu vykazujú približné rovnaké hodnoty. Krivky napätia a deformácie vzorky z fluidného posypu po vypálení však preukázali väčšie odchýlky od klasického krehkého lomového správania. Predpokladá sa, že to súvisí s existujúcimi slabšími vrstvami v štruktúre, ktoré umožňujú, aby sa trhliny počas šírenia ohýbali. [31]



Obr. 18 Graf závislosti napätia na deformácii škrupiny vytvorenej fluidným posypom [31].

3.4 Namáčanie a sušenie

Ponáranie, okvapkávanie a posypávanie modelových zostáv sa vykonáva ručne, roboticky alebo mechanicky. Na zvýšenie produktivity sa v zlievarňach sa čoraz častejšie používajú roboty, ktoré zabezpečujú jednoduchšie spracovanie väčších dielov a rovnomernejšie zmočenie jednotlivých modelových zostáv. Špecializované mechanické zariadenia pracujú rýchlejšie, najmä pri štandardizovaných modelových zostavách. [8]

3.4.1 Doba ponorenia

Väčšinou sa ponáranie vykonáva na vzduchu, ale v niektorých prípadoch sa aplikuje ponáranie vo vákuu. Zistilo sa, že ponáranie vo vákuu je veľmi účinné na nanášanie povlaku tam, kde sú malé diery, ktoré komplikujú odstránenie vzduchových bublín. [8]

Ideálna doba ponorenia je približne 15 – 20 sekúnd. Ponorenie na krátky čas (napr. 10 s) môže mať za následok delamináciu v dôsledku nedostatočného nasiaknutia spojiva do predchádzajúcich vrstiev. Pri ponorení foriem na dlhší čas ako je odporúčané, dochádza k nadmernému nasiaknutiu, čo vedie k zmäknutiu predtým vysušených vrstiev a tiež k zvýšeniu množstva vody, ktoré je potrebné odstrániť počas nasledujúceho sušenia. [33]

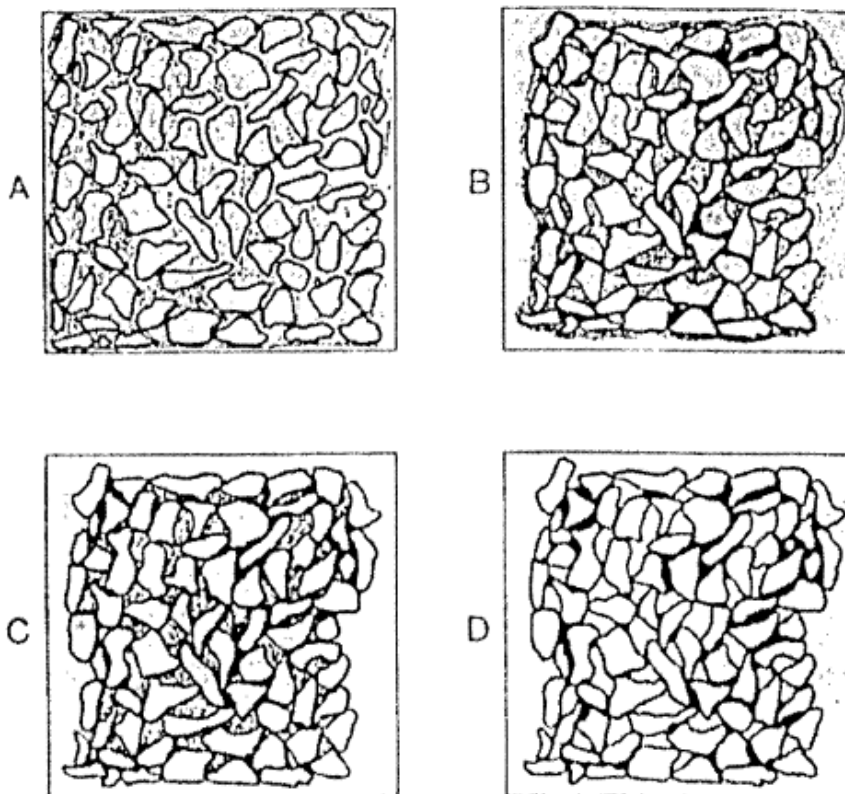
Podľa neoficiálnych štúdií, opätovné navlhčenie vysušenej keramickej škrupiny vplyvom nadmernej doby ponorenia, zvyšuje pevnosť škrupinových foriem. Stupeň navlhčenia závisí aj od množstva vody obsiahnutej v danej suspenzii. Suspenzia s nízkou viskozitou bude mať väčšie množstvo vody, a tak umožní nasiaknutie väčšieho množstva do predtým vysušených vrstiev. Ak sa spojivo dostane do predtým vysušených vrstiev škrupiny, dôjde k určitému stupňu spevnenia. Teoreticky, pri opätovnom zvlhčení sa do dutín predchádzajúcich foriem ukladá ďalšie spojivo, ktoré zvyšuje pevnosť. Aby mohlo prebehnúť toto spätné navlhčenie, predchádzajúca vrstva musí byť dobre vysušená – póry v tejto vrstve musia byť otvorené

a zbavené vody. Následným namočením sa potom môže vlhkosť voľne vsiaknuť do vysušených vrstiev. Čím je doba schnutia medzi jednotlivými vrstvami dlhšia, tým viac sa otvárajú póry v jednotlivých vrstvách a tým lepšie sa opätovne zvlhčujú predchádzajúce obaly. Voda obsiahnutá v suspenzii môže zmočiť posledné štyri vrstvy keramickej škrupiny. Nadmerné nasiaknutie vedie k zmäknutiu predtým vysušených vrstiev a tiež k zvýšeniu množstva vody, ktoré je potrebné odstrániť počas nasledujúceho sušenia. [34; 33]

3.4.2 Doba sušenia a zmršťovanie

Sušenie sa zvyčajne vykonáva na otvorených regáloch alebo dopravníkoch, ale niekedy sa používajú aj skrine alebo tunely. Mechanizmus sušenia závisí od kontrolovaného odstraňovania vlhkosti. Rýchlosť sušenia medzi jednotlivými vrstvami zohráva dôležitú úlohu z hľadiska šetrenia času, ale aj z hľadiska dosiahnutia optimálnej pevnosti. Nanosenie ďalšej vrstvy keramickeho obalu na predchádzajúcu nedokonale vysušenú vrstvu, ovplyvňuje mechanické vlastnosti, najmä pevnosť škrupiny. V niektorých prípadoch dochádza k vzniku trhlín alebo deformácii. Nadmerné sušenie zase môže negatívne ovplyvniť priepustnosť škrupiny. [8; 33; 35]

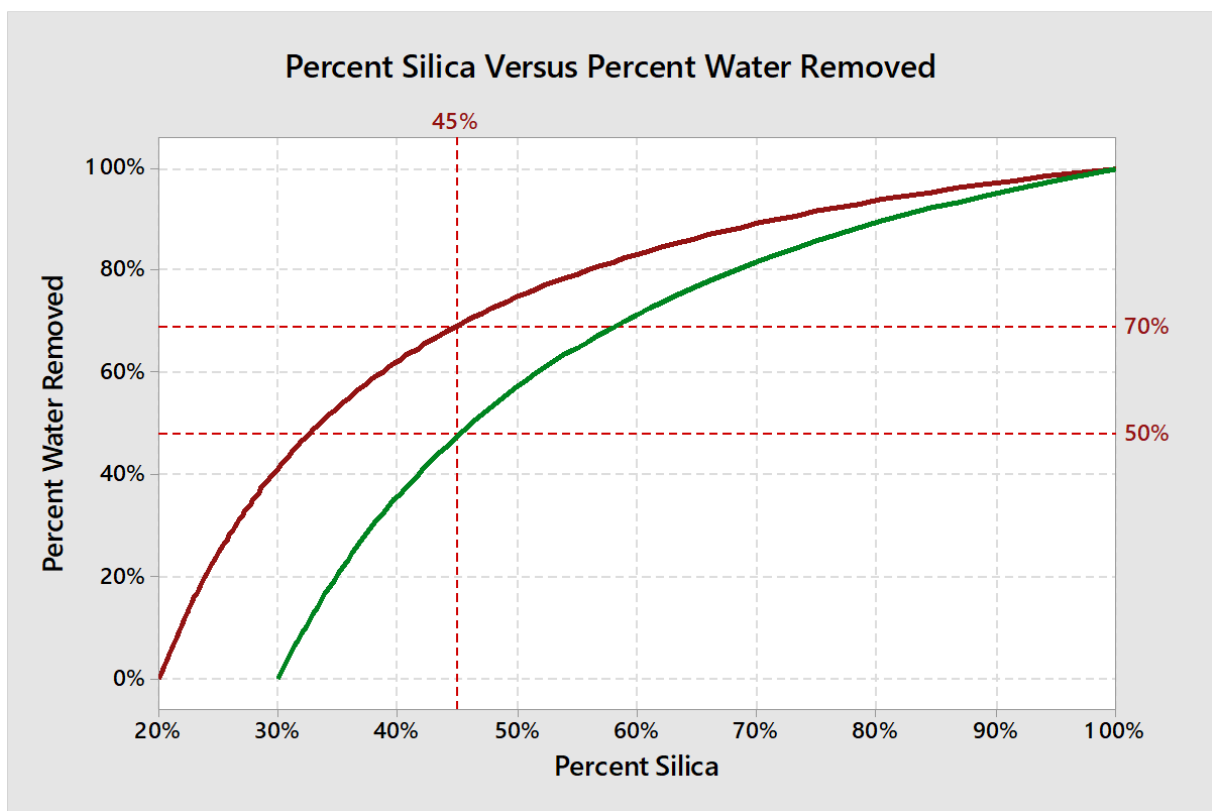
Obr. 19 znázorňuje jednotlivé fázy sušenia keramickej škrupiny. V časti A na obr. 19 je zobrazená štruktúra práve namočeného obalu – častice sú od seba oddelené veľkým množstvom vody. V časti B je vidieť, že sa častice začínajú navzájom dotýkať a došlo k určitému zmršteniu, čo bolo spôsobené odstránením časti vody. V časti C sa jednotlivé častice medzi sebou dostali do maximálneho kontaktu a tým sa zastavilo následné zmršťovanie. Prebytočná voda zostala uzavretá v medzičasticových priestoroch. V poslednej fáze sušenia (časť D) je väčšina prebytočnej vody odstránená, ale časť jej zostáva v malých kapilárach spolu s fyzikálne absorbovanou vodou. [33; 35; 36]



Obr. 19 Fázy sušenia keramickeho povrchu [35].

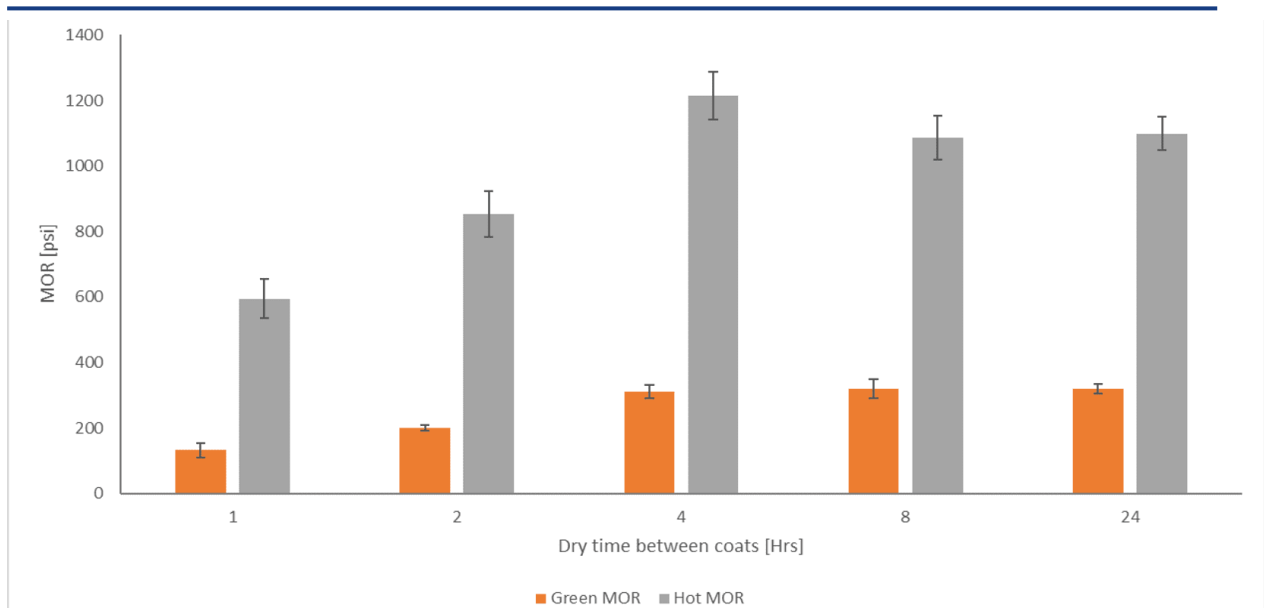
Sušenie komplikuje vysoká tepelná rozťažnosť a zmršťovanie voskov. Ak je sušenie príliš rýchle, chladiaci efekt spôsobuje zmršťovanie vrchného povlaku, zatiaľ čo spodná vrstva je stále mokrá a nespojená. Za normálnych okolností má napätie tendenciu byť väčšie v blízkosti povrchu (pretože vonkajší povrch má tendenciu zmršťovať sa rýchlejšie ako vnútro), čo spôsobuje diferenciálne zmršťovanie pevnej látky, ktoré spôsobí praskanie. Preto, aby sa tomu zabránilo, relatívna vlhkosť sa zvyčajne udržiava nad 40 %, zvyčajne na odporúčanej hodnote 50 %. [8; 36]

Množstvo vody, ktoré je potrebné odstrániť počas sušenia závisí od množstva vody obsiahnutej v suspenzii. Od toho závisí aj dĺžka sušenia, ktorá by mala byť dostatočne dlhá nato aby sa začalo gélovanie spojiva. Čas gelácie závisí od mnoho faktorov ako napríklad veľkosť častíc spojiva, typ a percentuálny podiel polyméru. Percento vody, ktoré musí byť odstránené na tvorbu sol – gélu závisí od počiatkovej koncentrácie spojiva. Ak suspenzia neobsahuje žiadne polyméry, bude sa musieť odstrániť približne 70% vody pri 20% oxide kremičitom. Pri obsahu 30% oxidu kremičitého sa bude vyžadovať odstránenie iba 50% vody. [34]



Obr. 20 Závislosť odstraňovania vody na percentuálnych obsahoch oxidu kremičitého [34].

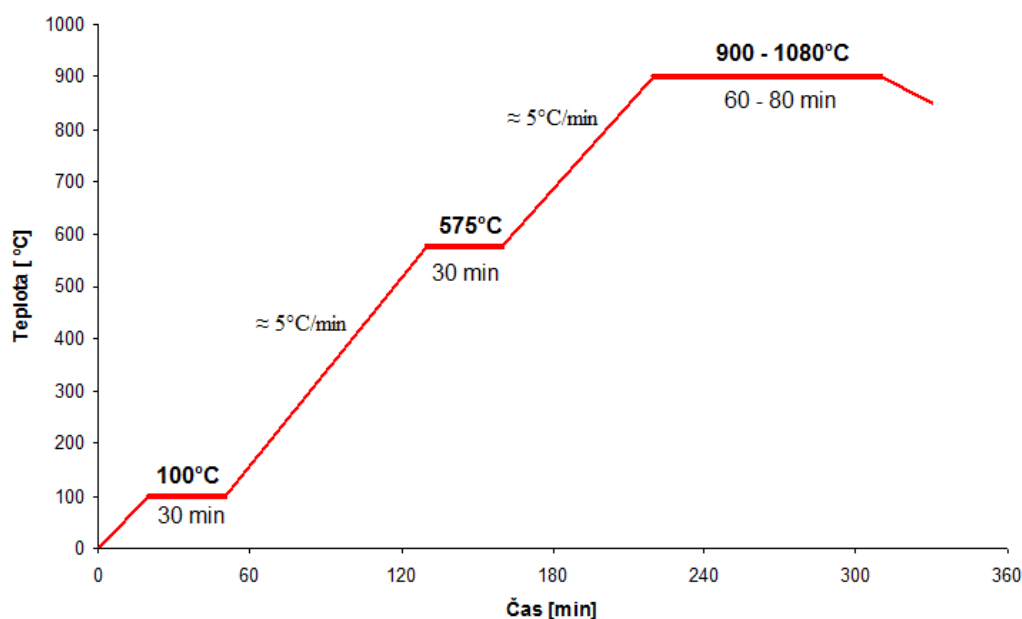
Na určenie ideálnej doby sušenia medzi jednotlivými obalmi pri tvorení keramickej škrupiny bol vytvorený výskum [37]. Z grafu na obr. 21 je viditeľné, že najväčšiu pevnosť za surova aj za zvýšených teplôt dosahovala škrupina po štyroch hodinách sušenia medzi jednotlivými obalmi. Oveľa nižšiu pevnosť za surova aj za vypálenia mali škrupiny s kratšou dobou sušenia (1 a 2 hodiny). Nižšie pevnosti sú spôsobené neúplným stuhnutím spojiva. Medzi pevnosťami nameranými počas 4, 8 a 24 hodín sušenia nebol prakticky žiaden rozdiel, to ale neznamená že dlhšie sušenie je neefektívne. Pri odvoskovaní v parnom autokláve môže byť akákoľvek zvyšková vlhkosť škodlivá z dôvodu veľkej expanzie, ku ktorej dochádza pri premene vody na paru, takže dlhšie sušenie síce nezvyšuje pevnosť ale znižuje riziká praskania počas vytavovania vosku v autokláve. [37]



Obr. 21 Závislosť doby sušenia jednotlivých vrstiev na pevnosti škrupiny [37].

3.4.3 Teplota a doba žihania

Dôvodom žihania keramickej škrupiny je spálenie zvyškov voskovej štruktúry, ako aj spekanie škrupiny s cieľom zlepšiť pevnosť škrupiny pre následnú operáciu odlievania. Rôzne teploty a časy výpalu majú významný vplyv na tepelno-mechanické vlastnosti keramickej škrupiny. Počas výpalu dochádza k spekaniu a hrubnutiu a ide o riadené procesy, preto čas, teplota a teplotný gradient zohrávajú dôležitú úlohu. Pri žihaní keramickej škrupiny pri relatívne nízkych teplotách (menej ako 600 °C) počas kratšieho časového obdobia (1 hodina) nie je spekanie a hrubnutie významné. Žihacia teplota je však vyššia ako 800°C, ideálne okolo 1000°C. Pri týchto teplotách by sa mala škrupina žihať po dobu minimálne 1 hodiny. Rýchlosť ohrevu závisí na druhu použitého žiaruvzdorného materiálu. Škrupiny vyrobené z kremennej múčky a kremenného piesku vyžadujú pomalšie prehrievanie z dôvodu reakcie na tepelné šoky (obr. 22). Zirkón, korund, mullit a tavený kremeň nemusia byť žihané pozvoľným ohrevom. [37; 57]



Obr. 22 Postup žihania keramickej škrupinovej formy zo žiaruvzdorného kremeňa [57].

4 MOŽNOSTI SKÚŠANIA KERAMICKÝCH SUSPENZIÍ A ŠKRUPÍN

Proces výroby keramickej škrupiny si vyžaduje dôkladnú kontrolu počas mnohých krokov alebo operácií. Skúšky keramických suspenzií a keramických škrupín sú dôležité pre optimálnu výrobu konečných odliatkov. Najrozšírenejšími kontrolnými postupmi sú meranie počiatočných zložiek, teploty suspenzie, hustoty, pH a viskozity. Medzi sledované vlastnosti keramických škrupín patria: hmotnosť, pevnosť v ohybe (za surova a za zvýšených teplôt), upravené lomové zaťaženie a priepustnosť. [8]

4.1 Skúšky keramickej suspenzie

Kvalita keramickej suspenzie je veľmi dôležitá pre zisťovanie reológie suspenzie. Metódy kontroly sa v jednotlivých zlievarňach značne líšia v závislosti od požadovaných nárokov na konečný produkt. Existuje mnoho činiteľov, ktoré môžu ovplyvniť konečné vlastnosti škrupiny aj konečného odliatku. Z tohto dôvodu je pred výrobou škrupiny veľmi dôležitá kontrola keramickej suspenzie. Pri zanedbaní kontroly sa zvyšuje riziko väd škrupiny a s tým spojené aj vady odliatkov. Kontrola týchto procesov ovplyvňuje hrúbku škrupiny, krycie vlastnosti keramických suspenzií, destabilizáciu spojív a zabezpečuje optimálne vlastnosti keramickej škrupiny. [9; 39; 40]

4.1.1 Kontrola hustoty

Celková hustota keramickej suspenzie je daná obsahom jednotlivých zložiek, ktoré sa v nej nachádzajú. Nízka hustota znamená, že suspenzia obsahuje malý podiel žiaruvzdorných pevných látok. Nízka hustota je ovplyvnená aj vzduchom v suspenzii. Naopak, vysoká hustota suspenzie je spôsobená vysokým obsahom žiaruvzdorných látok. [9]

Meranie hustoty prebieha odvážením prázdneho odmerného valca, následným naliatím 100 ml dobre premiešanej keramickej suspenzie a opätovným zvážením odmerného valca. Celková hustota sa vypočíta podľa vzorca :

$$\rho = \frac{m_{pl} - m_{pr}}{100} \left[\frac{g}{ml} \right] \quad (4.1)$$

kde: m_{pl} - hmotnosť naplneného valca [g]
 m_{pr} - hmotnosť prázdneho valca [g]

To znamená, že od hmotnosti naplneného valca (m_{pl}) sa odčíta hmotnosť prázdneho (m_{pr}) a rozdiel sa podelí 100. Výsledná hodnota udáva mernú hustotu v gramoch na milileter (g/ml). Predpokladajú sa chyby pri meraní, preto je táto skúška prevádzaná trikrát a z výsledných hodnôt sa vypočíta aritmetický priemer.

4.1.2 Kontrola viskozity

Viskozita suspenzie je jedným z najpoužívanejších kontrolných testov pri výrobe keramickej suspenzie. Aby bola suspenzia považovaná za vhodnú na použitie, musí byť dôkladne premiešaná a hodnota viskozity stabilná. Stabilita viskozity závisí od zloženia (pomeru plniva ku spojivu). Pri nevhodnej viskozite môže dôjsť k zlej priepustnosti, zhoršenej pevnosti a praskaniu škrupiny, nedokonalému alebo nerovnomernému pokrytiu modelu. Vlastnosti, ktoré tiež môžu byť ovplyvnené viskozitou sú napríklad drsnosť povrchu, tepelná vodivosť a chemická reaktivita. Ak viskozita prekročí stanovenú hodnotu, do suspenzie sa pridá destilovaná voda. Viskozita je úzko spojená s teplotou, to znamená, že kolísanie teploty môže mať veľký vplyv na viskozitu. [9; 22; 39; 41]

Prevádzkové meranie viskozity sa vykonáva pomocou špeciálnych prietokových pohárov – Zahnov (obr. 23) alebo Fordov. Tieto poháriky majú rôznu veľkosť výstupných otvorov.

Meranie viskozity začína ponorením pohára do dokonale premiešanej suspenzie a následným vytiahnutím (obr. 24). Čas prietoku sa začne merať vytiahnutím pohára zo suspenzie a končí pri prvom prerušení toku alebo pokiaľ nie je vidieť otvor na spodnej časti pohára. Meranie sa uvádza ako čas, ktorý uplynie, kým objem pohára pretečie otvorom v spodnej časti pohára. Koncový bod skúšky sa musí zvoliť tak, aby bol pri jednotlivých skúškach rovnaký. [22; 42]



Obr. 23 Zahnov pohárik 5.



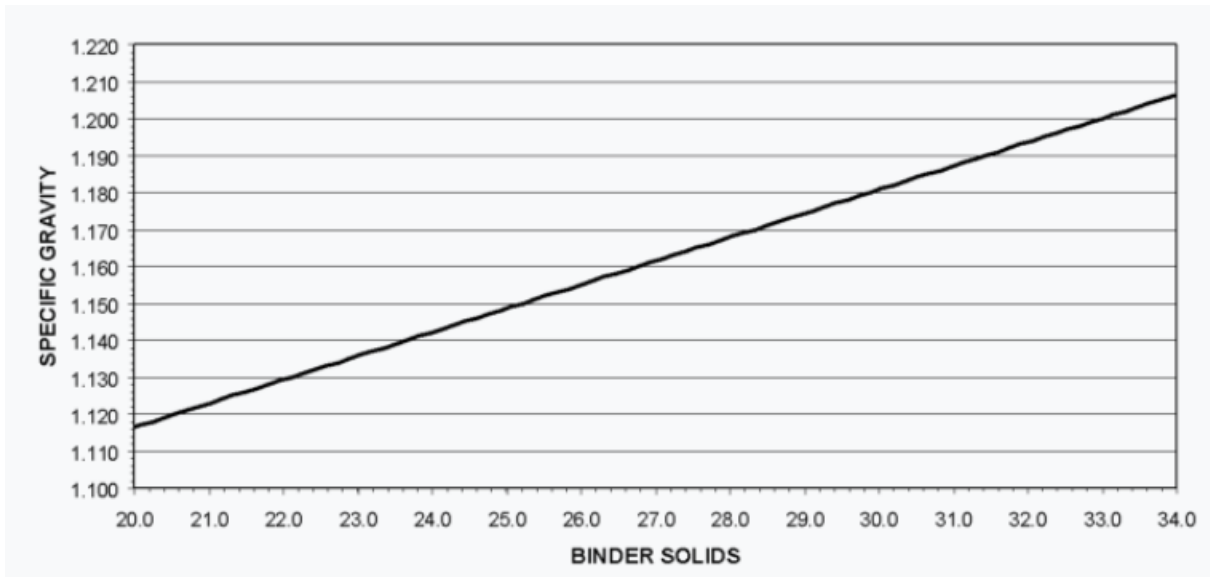
Obr. 24 Meranie viskozity.

4.1.3 Test obsahu pevných látok v spojive (Binder solid)

Skúšku špecifickej hmotnosti prevádzame z dôvodu zistenia množstva SiO_2 obsiahnutého v keramickej suspenzii. Zrná oxidu kremičitého zabezpečujú viazanie základného materiálu škrupiny. Veškeré výkyvy od doporučených obsahov majú za následok oslabenie škrupiny. Nekontrolované tuhé látky spojiva môžu ovplyvniť životnosť suspenzie a výkonnosť obalu. Ak sa pri testovaní zistí vysoký podiel obsahu SiO_2 , je vhodné pridať do suspenzie vodu. Naopak ak testy ukážu nedostatok SiO_2 , je nutné pridať spojivo.

Prvá časť merania pevných látok v spojive pozostáva z oddelenia spojiva od žiaruvzdorných látok. Z dokonale premiešanej a stabilizovanej suspenzie sa odoberie do štyroch skúmaviek približne 50ml suspenzie a vloží sa do odstredivky tak, aby bola vyvážená. Spojivo od žiaruvzdorného materiálu sa odstreďuje pri 3000 otáčkach za minútu po dobu 30 minút. Potom sa odstredená kvapalina zleje do novej skúmavky a znovu sa dá do odstredivky pri 3000 ot/min na ďalších 30 min.

Druhá časť merania je na základe vážkových testov. Zváži sa prázdny pykometer o objeme 10 ml s presnosťou na 0,01 gramu. Naleje sa do neho odstredená kvapalina a naplnený pykometer sa znovu zváži s rovnakou presnosťou. Od hmotnosti naplnenej odmernej banky sa odpočíta hmotnosť prázdnej banky a tento súčet sa podelí 10. Nakoniec sa podľa grafu (obr. 25) spojivových látok závislých na mernej hmotnosti určí celkové množstvo SiO_2 v spojive.



Obr. 25 Graf závislosti pevných látok v pojive na mernej hmotnosti [42].

4.1.4 Test obsahu žiaruvzdorných látok v spojive (Total solid)

Celkový obsah pevných látok v suspenzii je kombináciou pevných látok v spojive a žiaruvzdorných tuhých látok. Výpočet celkového množstva tuhých látok je potrebný na určenie percentuálneho podielu žiaruvzdorných pevných látok. Vysoký obsah týchto látok môže viesť k praskaniu behom vytavovania. Naopak nízky obsah má za následok oslabenie surových aj vyžiháných škrupín, čo spôsobuje vybúlenie. [26]

Meranie sa vykonáva pomocou váženia. Najskôr sa zväžia prázdne hliníkové misky s presnosťou na 0,01 gramu. Do tých sa naleje odobraná vzorka keramickej suspenzie a zväží sa hliníková miska aj so vzorkou. Následne sa odčíta od hmotnosti plnej misky, hmotnosť prázdnej, aby sa určila hmotnosť mokrej vzorky. Takto naplnené a odmerané vzorky sa vložia do pece na 1 hodinu pri teplote približne 180 stupňov. Po vychladnutí boli vysušené vzorky zvážené a znovu bola od nich odčítaná hmotnosť prázdnej misky, aby sa určila celková hmotnosť suchej vzorky. Celkový obsah žiaruvzdorných látok sa vypočíta podielom hmotnosti suchej a mokrej vzorky. Pre percentuálne určenie sa výsledná hodnota vynásobí 100. [26]

4.2 Skúšky keramickej škrupiny

Okrem testov keramickej suspenzie je treba vykonávať aj testy keramických škrupín, ktorými sa zisťuje, ako sa bude daná škrupina správať za izbovej, ale aj za zvýšenej teploty, pri použití rôznych materiálov a tiež ako sa bude správať pri odlievaní kovu. Najbežnejšími skúškami je pevnosť v ohybe, priedušnosť, tepelná rozťažnosť a spektrálna elektrónová mikroskopia. Všetky tieto skúšky sa radia medzi deštruktívne, preto je nutné vytvoriť pre každé testovanie vzorku.

4.2.1 Pevnosť v ohybe (MOR)

Pevnosť v ohybe (MOR - z anglického názvu „modulus of rupture“), známa tiež pod názvom ohybová sila alebo priečna medza pevnosti, je vlastnosť materiálu, ktorá definuje napätie materiálu tesne pred tým, ako sa zlomí. Pevnosť v ohybe je teda najvyššie napätie, ktoré môžeme dosiahnuť pred porušením skúšobného vzorku. [9; 43]

Príprava vzorku pre tieto skúšky je rozhodujúca. Skúšobné teleso vytvoríme tak, že na voskový model v tvare obdĺžnikovej dosky postupne nanášame keramickú obalovú hmotu, potom

vytavením odstránime voskový model. Po zmeraní rozmerov jednotlivých skúšobných telies ich umiestnime do zaťažovacieho prístroja na dve podpory. [6; 44]

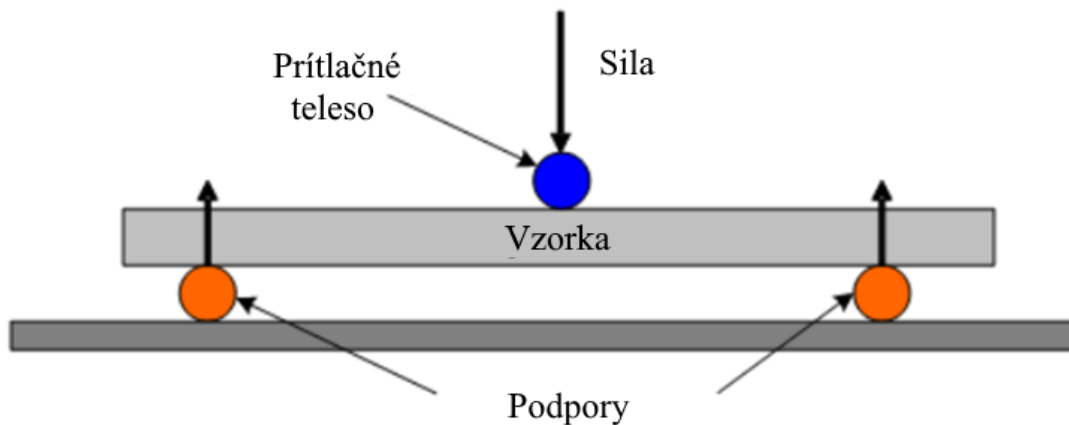
- **Trojbodová skúška v ohybe**

Pri trojbodovej skúške sa napätie mení po celú dobu skúšky. Zaťažovacia sila pôsobí iba v jednom bode (obr. 26). Trojbodová skúška ohybom je doposiaľ viac používanou metódou stanovenia pevnosti škrupiny. Pred umiestnením vzorky do zariadenia je potrebné zmerať jej základné parametre ako je šírka a hrúbka vzorku a na výpočet je potrebné zmerať aj vzdialenosť medzi podporami. [45; 46]

Potom sa pevnosť v ohybe pri trojbodovom zaťažení vypočíta podľa vzorca:

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} [MPa] \quad (4.2)$$

kde: F - lomové zaťaženie [N],
 b - šírka vzorku [mm]
 h - hrúbka vzorku [mm],
 l - vzdialenosť medzi podporami [mm]



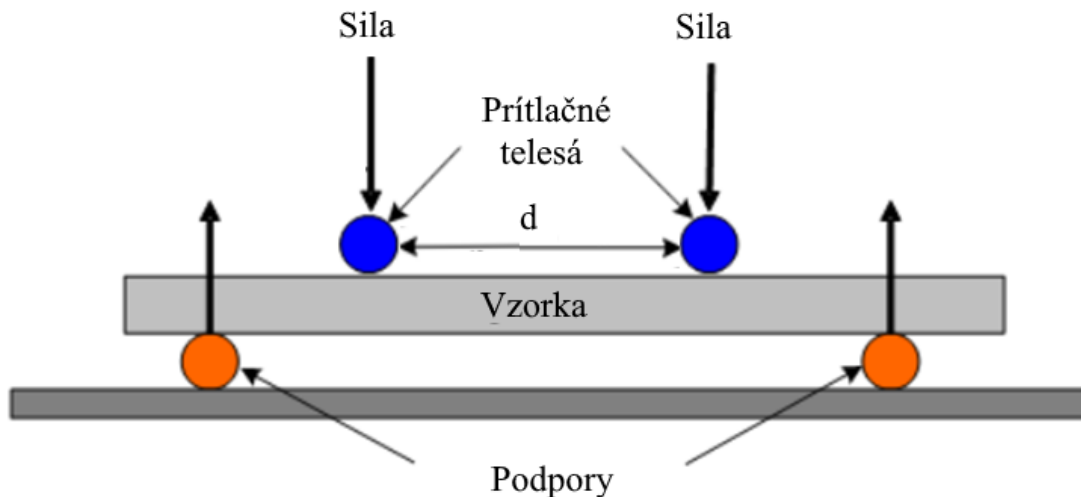
Obr. 26 Trojbodová skúška v ohybe [46].

- **Štvorbodová skúška v ohybe**

Pri štvorbodovej skúške ohybom pôsobí zaťažovacia sila v dvoch bodoch zároveň (obr. 27), čo zabezpečuje rovnomernejšie zaťaženie na väčšej ploche. Hoci podľa výskumov štvorbodové zariadenie na skúšku v ohybe poskytuje presnejšie výsledky, častejšie sa používa trojbodové skúšanie z dôvodu problémov počas ukladania vzoriek do zariadenia. Poloha horných podpier štvorbodového ohybu bolo ťažšie vycentrovať na vzorke. [45]

$$MOR = \frac{3 \cdot F \cdot d}{b \cdot h^2} [MPa] \quad (4.3)$$

kde: F - lomové zaťaženie [N],
 b - šírka vzorku [mm]
 h - hrúbka vzorku [mm],
 d - priemerná vzdialenosť medzi podporami [mm]



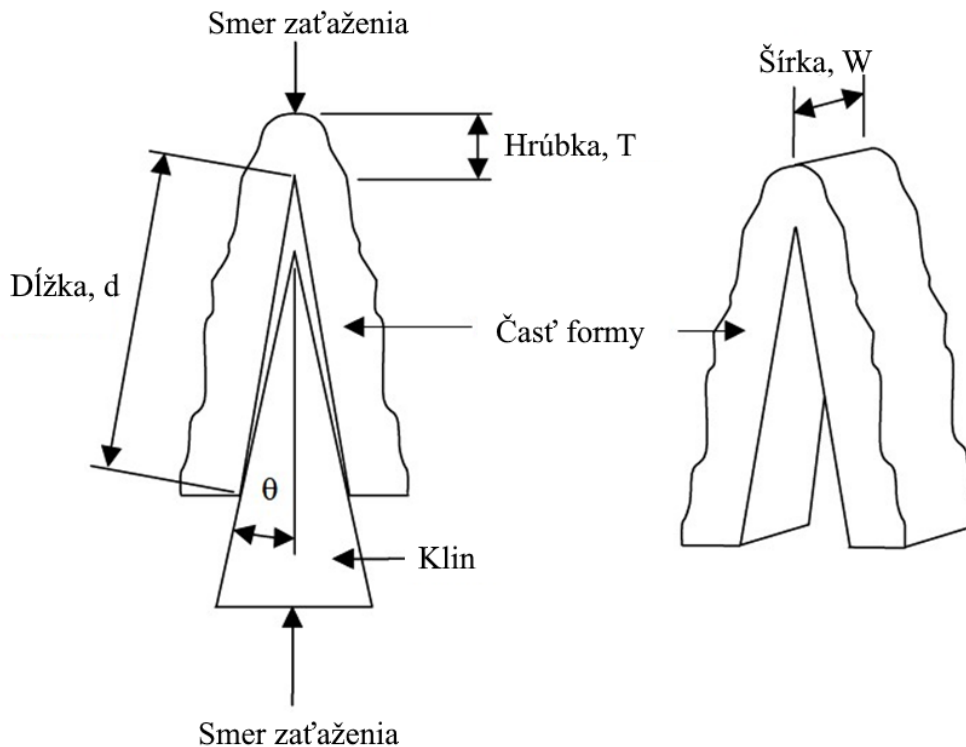
Obr. 27 Štvorbodová skúška v ohybe [46].

Kontrola pevnosti formy je jednou z najpoužívanejších foriem skúšania škrupiny v technológii vytaviteľného modelu. Najväčšie požiadavky na formu sú, aby bola forma pevná pri manipulácii, aby odolávala rozpínaniu vosku pri vytavovaní a odlievaní a v neposlednom rade aby sa po odlíatí dala jednoducho odstrániť. V dôsledku spekania a ďalších procesov prebiehajúcich počas vypaľovania sa štruktúra škrupinového materiálu vyvíja, preto je dôležité charakterizovať / skúmať škrupiny v niekoľkých podmienkach, ktoré sú reprezentatívne pre jednotlivé fázy odlievacieho cyklu. Preto sa prevádzajú pevnostné skúšky za troch stavov a to:

1. **za surova:** "vysušené" skúšobné vzorky (24 hodín pri izbovej teplote) – určenie schopnosti škrupiny odolávať manipulácii a odvoskovaní
2. **za zvýšených teplôt:** schopnosť škrupiny odolávať hydrostatickému tlaku tekutého roztaveného kovu.
3. **za vypálena:** „vyžíhané“ skúšobné vzorky (1000 °C počas 1 h a schladnutí na izbovú teplotu) – určenie, ako ľahko a rýchlo sa dá škrupina odstrániť po odlievaní bez poškodenia konečného odliatku

4.2.2 Upravené lomové zaťaženie (AFL)

Keramickej škrupine má rozdielnu štruktúru v rohových častiach v porovnaní s rovinami. Rozdielna štruktúra môže spôsobiť porušenie pri menšom zaťažení, preto je zaujímavé skúšať pevnosti práve v týchto miestach. Pre porovnanie pevností týchto oblastí s plochými oblasťami bola vyvinutá skúšobná metóda nazvaná upravené lomové zaťaženie (AFL – z anglického názvu „adjusted fracture load“). Ako bolo spomenuté na rozdiel od skúšky MOR, kde sa skúmajú vlastnosti na plochých oblastiach, pri AFL skúške sa skúmajú vlastnosti keramickej škrupiny v ostrých rohoch a okrajových oblastiach, kde najčastejšie dochádza k mechanickému namáhaniu. Skúšobná vzorka bola vyrobená pomocou špeciálne navrhnutého vzoru kosoštvorcového tvaru s definovaným vrcholovým uhlom. Následne sa tento skúšobný tvar vloží do klinovej konštrukcie ako je znázornené na obr. 28 a na vrchol začne pôsobiť sila. Skúšobný kus je zaťažený tak, že vnútorný povrch formy (t. j. primárna vrstva) je v ťahu cez okraj a vonkajší povrch je v tlaku. [48; 49]



Obr. 28 Upravené lomové zaťaženie [48].

Sila potrebná na porušenie skúšobného kusu sa zaznamená a pevnosť okraja sa vypočíta pomocou vzorca:

$$AFL = \frac{12,2 \cdot (\sin\theta \cdot \cos\theta \cdot F \cdot d)}{W \cdot T^2} [MPa] \quad (4.4)$$

- kde: θ - polovičný vrcholový uhol
 F - lomové zaťaženie [N],
 W - šírka vzorku [mm]
 T - hrúbka vzorku [mm],
 d - dĺžka vzorku [mm]

4.2.3 Priepustnosť

Ďalším dôležitým faktorom keramickej škrupiny je jej priepustnosť, ktorá zabezpečuje odvod vzduchu z dutiny formy počas odlievania kovu, aby sa zabránilo pórom, bublinám a prípadne nezabehnutiu kovu pri výrobe konečného odliatku. Priepustnosť foriem je tiež ovplyvnená tvarom a veľkosťou použitých žiaruvzdorných materiálov ako posypov – väčšie a hranatejšie častice budú mať medzi sebou väčšie medzery, menšie a guľaté sa budú viac lícovať. Priepustnosť tiež ovplyvňuje hrúbka nabalenej vrstvy – čím menšia hrúbka, tým nižšia vzdialenosť potrebná na únik plynov z formy. Posledným spôsobom, ktorým sa môže zlepšiť priepustnosť plynov je prídanie polymérov alebo organických vlákien do keramickej suspenzie, ktoré sa počas vyžihania spália a zostávajú po nich dutiny. Zvýšená priepustnosť škrupiny môže tiež pozitívne ovplyvniť očisťovanie škrupiny po odliatí. [1; 2; 7; 44]

Meranie prebieha nabaléním určitých počtov keramickej obalov (namočením do suspenzie a nanesením posypu) na pinpongovú loptičku (obr. 29) pripevnenú na dutú keramicnú trubičku.

Následně se žíháním odstraní pingpongová loptička. Pomocí laboratorního kompresoru sa cez sklenú trubičku pustí do vypálenej loptičky vzduch a odčítajú sa hodnoty napätia.



Obr. 29 Obalená vzorka na meranie priepustnosti [7].



Obr. 30 Meranie za zvýšenej teploty [7].

4.2.4 Skenovacia elektrónová mikroskopia (SEM)

Pri skenovacej elektrónovej mikroskopii sa používa elektrónový lúč, ktorý skenuje povrch vzorky a spôsobuje emisiu nízkoenergetických sekundárnych a spätne rozptýlených elektrónov. Tieto elektróny sa zhromažďujú a vytvárajú obraz povrchu vzorky. SEM je obzvlášť užitočná na pozorovanie povrchových znakov a lomových plôch a je tiež široko použiteľná pri všeobecných mikroštruktúrnych pozorovaniach. [24]

Príprava keramických vzoriek SEM prebieha v troch fázach; malé množstvá materiálu sa zalejú do živice, povrchy sa potom vyleštia postupne jemnejšími stupňami karborundového papiera a na záver sa doleští pridaním diamantovej pasty. Vzhľadom k tomu, že keramika je nevodivý materiál – neodráža elektróny produkujúce dopadom elektrónového lúča, je potrebné na povrch vzorku naniesť uhlík, ktorý urobí povrch vzorky vodivým a tým odrazí prebytočné elektróny. Jemný povlak uhlíku sa nanáša naparovaním. Nakoniec sa takto pripravená vzorka umiestni do prístroja na kontrolu v mikroskope SEM. [24]

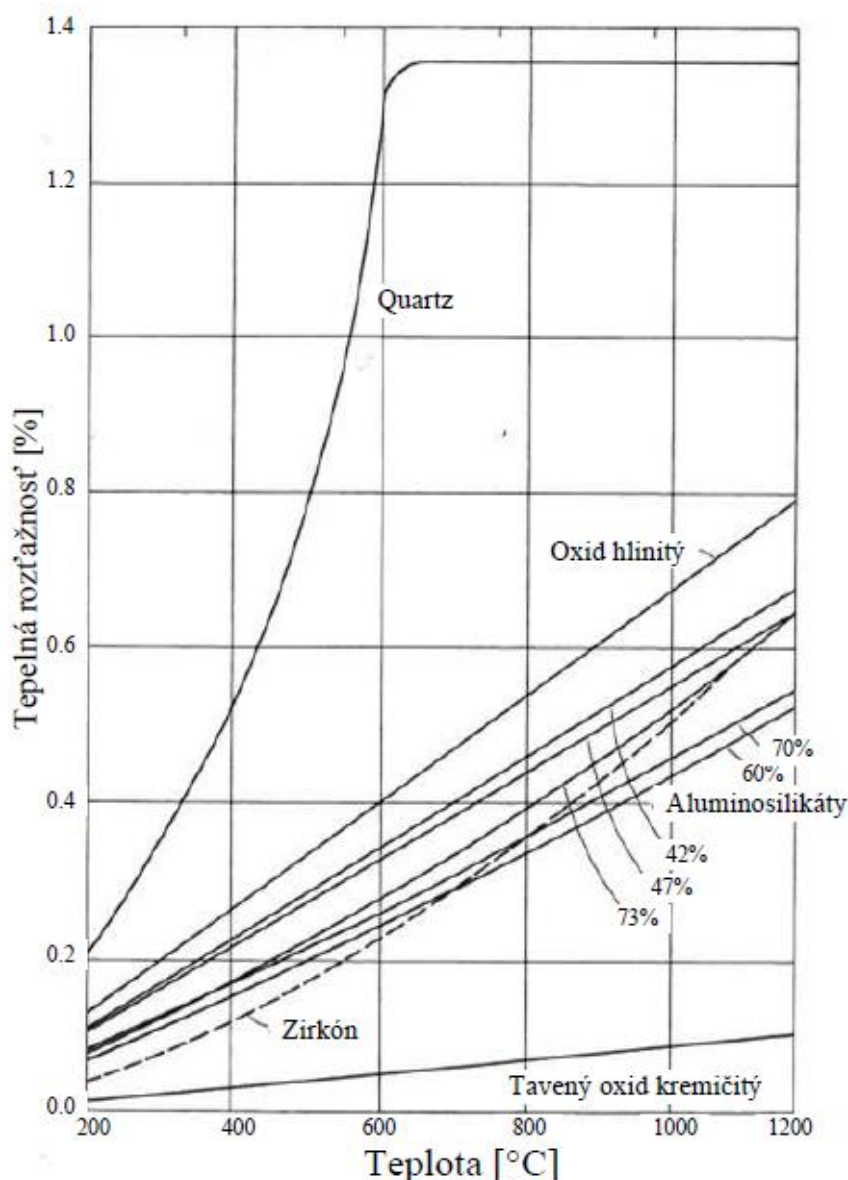
Skenovacia elektrónová mikroskopia sa používa na zobrazenie štruktúry niekoľkých rezov foriem vytvorených technológiou vytaviteľného modelu s cieľom pochopiť základné rozloženie žiaruvzdorných materiálov a spojiva. Táto technika sa používa aj na charakterizáciu žiaruvzdorných materiálov a na vyhodnotenie účinkov odlievania kovov a tepelného cyklu na celkovú štruktúru formy. SEM je obzvlášť užitočná na pozorovanie povrchových znakov a lomových plôch rôznych materiálov. [24]

4.2.5 Tepelná rozťažnosť

Tepelná rozťažnosť je veľmi dôležitou vlastnosťou materiálov a musí sa zohľadniť pri výrobe odliatkov technológiou vytaviteľného modelu. Rozmerové a mechanické vlastnosti materiálu sú citlivým ukazovateľom vnútorných štruktúrnych zmien. Stanovenie zmeny dĺžky alebo objemu vzorky v závislosti od teploty predstavuje techniku nazývanú dilatometria. Dilatometria sa použila na štúdium fázových zmien a spekania mnohých systémov kremičitých a

nekremičitých spojív. Materiál, ktorého štruktúra sa nemení, sa pri zvyšovaní teploty rovnomerne predlžuje. Štruktúrne zmeny v materiáli však môžu tento rozťahovací účinok potlačiť a pri určitých teplotách môže dôjsť k nespojitým zmenám dĺžky alebo koeficientu rozťažnosti. Zisťovanie a interpretácia takýchto zmien z hľadiska molekulovej štruktúry vzorky je základom termickej analýzy pomocou dilatometrie. [24]

Na skúšanie tepelnej rozťažnosti keramických škrupín sa používa skúšobná vzorka v tvare malého hranolu, ktorý je vyrezaný z keramickej škrupiny. Takto vytvorená vzorka je umiestnená do trubičky a pritlačená keramickým piestom, aby sa zamedzil jej pohyb behom skúšky. Potom je táto trubička so vzorkou vložená do pece, kde je podľa potreby zahrievaná požadovanou rýchlosťou na teplotu, ktorú treba dosiahnuť. Následne sa spustí meracie zariadenie, ktoré zaznamenáva hodnoty rozťažnosti vzorky v určitom časovom intervale. Počítačový software spracuje zaznamenané hodnoty a vykreslí z nich krivku závislosti rozťažnosti škrupiny na teplote. [26]



Obr. 31 Tepelná rozťažnosť vybraných druhov materiálov [8].

5 MOŽNOSTI MODIFIKÁCIE KERAMICKÝCH SUSPENZIÍ

Je nevyhnutné, aby každý priemysel, rovnako ako technológia vytaviteľného modelu zlepšila doterajšiu kvalitu a cenu konečného produktu. Pre lepšiu konkurencieschopnosť je potrebné znížiť výrobné časy, optimalizovať mechanické a fyzikálne vlastnosti keramickej škrupiny na zníženie množstva odpadu a vstupných nákladov, znížiť reakcie medzi kovom a formou, urýchliť dokončovacie operácie a zlepšiť rozbíjanie škrupín, aby nedošlo k poškodeniu konečných odliatkov. Pri všetkých týchto podmienkach by mala byť samozrejme dodržaná akosť výsledného odliatku. [1]

5.1 Modifikácia organickými látkami

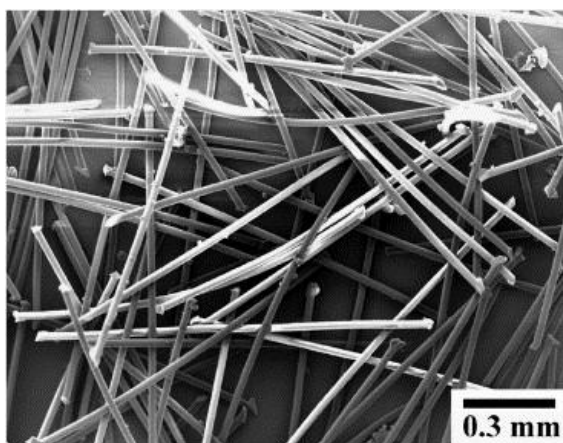
Vedci doteraz zistili, že pridaním organických alebo polymérnych vlákien ako výstužných materiálov do keramickej suspenzie má veľa pozitívnych vlastností. Namiešané vlákna vedú ku zlepšeniu mechanických vlastností a mikroštruktúre keramickej škrupiny, zlepšenej stavbe škrupiny pri použití menšieho počtu obalov. [1; 50]

Jednou z metód na skrátenie času výroby škrupín a zlepšenie jej vlastností počas odlievania aj pri odstraňovaní škrupiny, je pridanie prírodných vlákien do keramických suspenzií, čím sa eliminuje potreba drahých prísad tekutých polymérov. V dnešnej dobe je čoraz väčší záujem o výskum a vývoj nových materiálov, ktoré sú odvodené z obnoviteľných zdrojov. Prírodné vlákna sú tie, ktoré sú prirodzene dostupné a používajú sa ako výstuže na nahradenie existujúcich syntetických vlákien, ako sú sklenené, uhlíkové a amidové, aby sa zabránilo ďalšiemu zaťaženiu životného prostredia. Prírodné vlákna sú odvodené z prírodných zdrojov a tieto vlákna sú klasifikované na základe pôvodu extrakcie, ako sú rastlinné vlákna, živočíšne vlákna a minerálne vlákna. Je dostupných veľa rôznych typov organických vlákien, ktoré zlepšujú keramické obaly tvorené pri technológii vytaviteľného modelu. Líšia sa účinkami, cenou a dostupnosťou. Poznáme niekoľko druhov, ktoré budú spomenuté v nasledujúcich podkapitolách. [1; 50; 51]

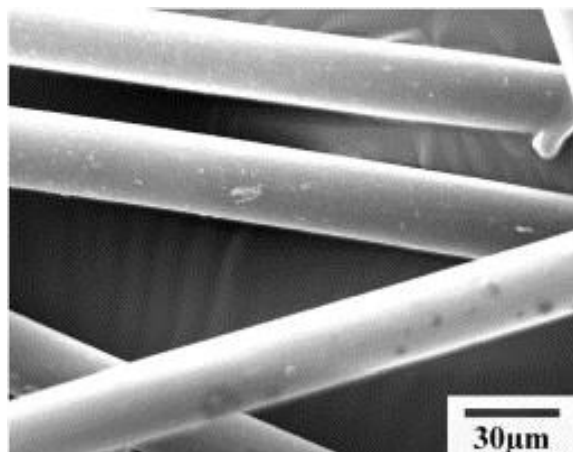
5.1.1 Nylonové vlákna

Polyamidové alebo „nylonové“ vlákna sú založené na amidových skupinách ($-C(O)NH-$) obsiahnutých v reťazci atómov uhlíka, ktoré tvoria kostru atómov spojených silnými kovalentnými väzbami. Molekuly sú lineárne to znamená, že sa môžu ohýbať a otáčať pri každej väzbe, takže molekuly nie sú dokonale zarovnané rovnobežne s osou vlákna, čo vedie k nízkemu Youngovmu modulu. Amidové skupiny tiež priťahujú vodu, vďaka čomu je vlákno primerane hydrofilné (obnovenie vlhkosti o 4 %) a zmáčateľné. [52]

Morfológia nylónových vlákien je znázornená na obr. 32. Pridané vlákna majú priemer približne 20 μm a dĺžku 1 mm. Pri väčšom zväčšení na obr. 33, je detailnejšie zobrazený povrch vlákien. Relatívne hladká povrchová vrstva nylonu bude mať veľký vplyv pri manipulácii s vláknom počas pôsobenia mechanických síl. [1]

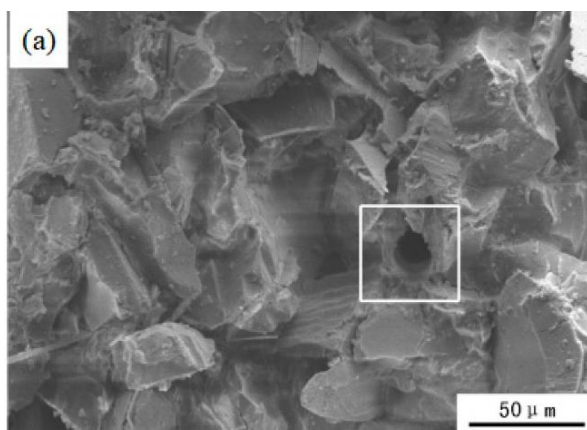


Obr. 32 Štruktúra a morfológia nylonových vlákien [1].

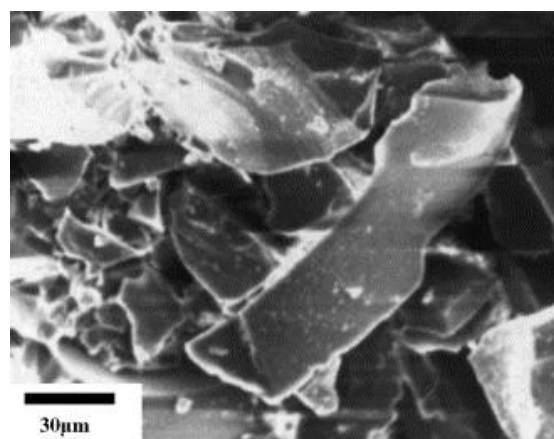


Obr. 33 Detailnejší povrch nylonových vlákien [1].

Modifikácia keramických škrupín nylonovými vláknami sa aplikuje z viacerých dôvodov. Zapracovaním nylonových vlákien do suspenzie umožnilo vytvoriť hrubší obal na voskovom modeli pri menšom počte obalových vrstiev, čo má za následok zníženie časových a materiálových nákladov na výrobu. Taktiež pridaním týchto vlákien sa ukázalo, že škrupina má vyššie pevnosti v ohybe za surova, ktorá je potrebná nato, aby sa s ňou dalo lepšie manipulovať počas procesu odvoskovania bez praskania a iných defektov. Vzhľadom na vysoké teploty následného žihania sa nylon poškodí, čo môže spôsobiť póry a defekty v matrici škrupiny. Napriek tomu, vznik týchto mikropórov môže byť prospešný v zabránení šírenia trhlín. Tvorba dutín po vyhorených vláknach (obr. 34 a obr. 35) zvyšuje pórovitosť a tým sa zvýšila tvorba sieťových dutín vo vnútri keramiky, ktoré zvyšujú priepustnosť keramického obalu. [1; 50]

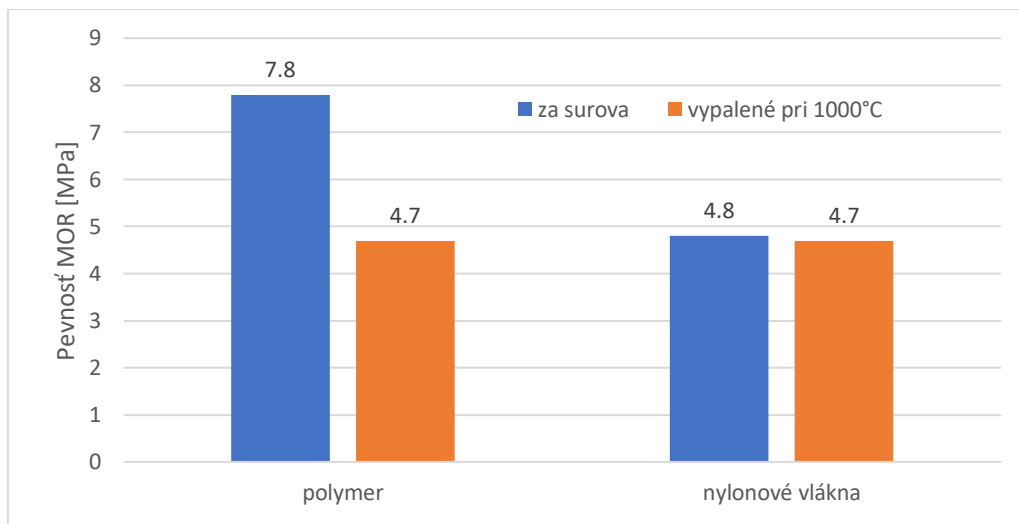


Obr. 34 Dutina po vypálení nylonového vlákna [49].



Obr. 35 Dutiny zanechané po vypálení nylonových vlákien [1].

Porovnanie pevností dosiahnutých pri izbovej teplote a pri žihaní, na teplote 1000°C po dobu 60 min, pomocou 3-bodovej ohybovej skúšky pre obe vzorky škrupín je uvedené na obr. 36. Škrupina s polymérom má vysokú pevnosť v surovom stave a zníženú pevnosť po vypálení pri 1000 °C, pretože polymér vyhorí. Keramika vystužená vláknami má prekvapivo nižšiu pevnosť v surovom stave ako polymérom modifikovaná škrupina a ekvivalentnú pevnosť pri vypálení, čo naznačuje, že vlákno neovplyvňuje pevnosť v surovom stave. [1]



Obr. 36 Graf pevností polymeru a nylonových vláken [1].

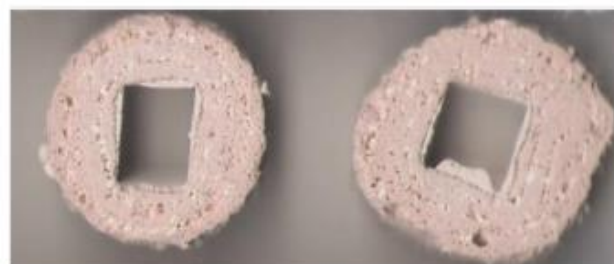
5.1.2 Pilinový prach

Kvalitu keramickej škrupiny je možné zvýšiť aj pridaním prirodzene dostupnej prísady ako sú piliny, ktoré vznikajú pri rezaní dreva. Medzi jeho fyzikálne vlastnosti patrí nízka hustota, vysoká pórovitosť, vysoká schopnosť zadržiavania vody, nízke náklady. [53]

Organické vlákna sa takmer vždy pridávajú až do sekundárneho obalu, pretože sú nepravidelne usporiadané, čo môže viesť, pri pridaní do primárneho obalu, k nedokonalému povrchu odliatku. Pridanie pilinového prachu s hladkým povrchom do sekundárnych suspenzií umožnilo tvorbu hrubšieho obalu v porovnaní so škrupinou bez pridaných vláken už pri menšom počte obalov (obr. 37) dokonca aj v kritických oblastiach ako sú rohy (obr. 38). [53]

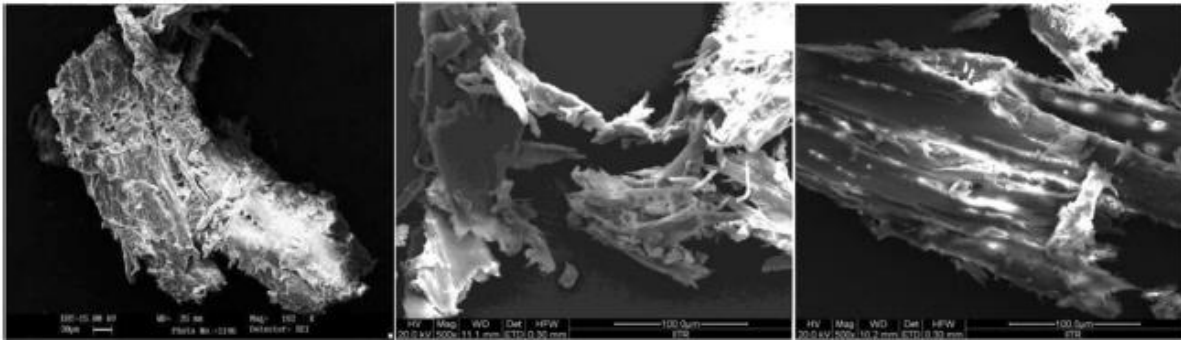


Obr. 37 Hrúbka škrupiny (a) bez pridaní pilín, (b) s pridaním pilín [53].



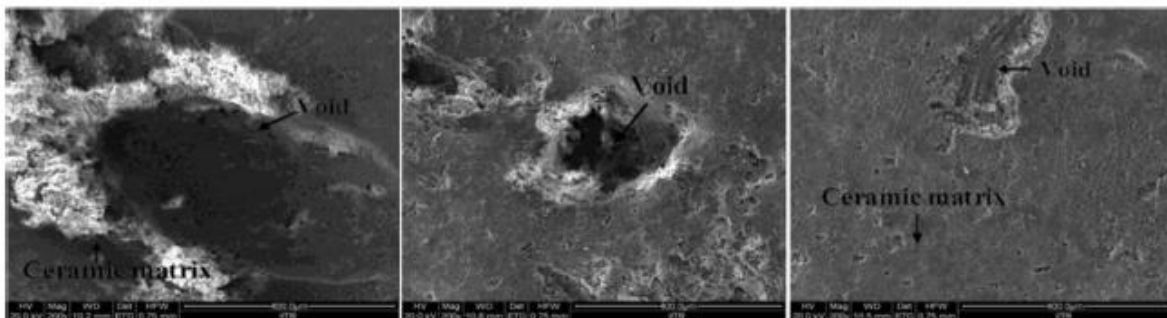
Obr. 38 Hrúbka škrupiny na rohoch (a) bez pridaní pilín, (b) s pridaním pilín [53].

Na vzorkách po pridaní pilín do keramickeho obalu boli v štúdiu [53] vykonané skúšky pevnosti pre oba typy škrupiny – konvenčná aj pilinami modifikovaná keramickejškrupina v surovom aj vypálenom stave. Modifikáciou sa zvýšila pevnosť za surova, ale znížila sa pevnosť po vypálení v porovnaní s konvenčnou. Zvýšenie pevnosti za surova sa môže pripísať nepravidelnému vláknitému tvaru pridaných pilín (obr. 39), ktorý spôsobil lepšie prepojenie medzi pilinami a keramickeou maticou medzifázovú adhéznu väzbu. [53]



Obr. 39 Mikrostruktúra častíc pilín [53].

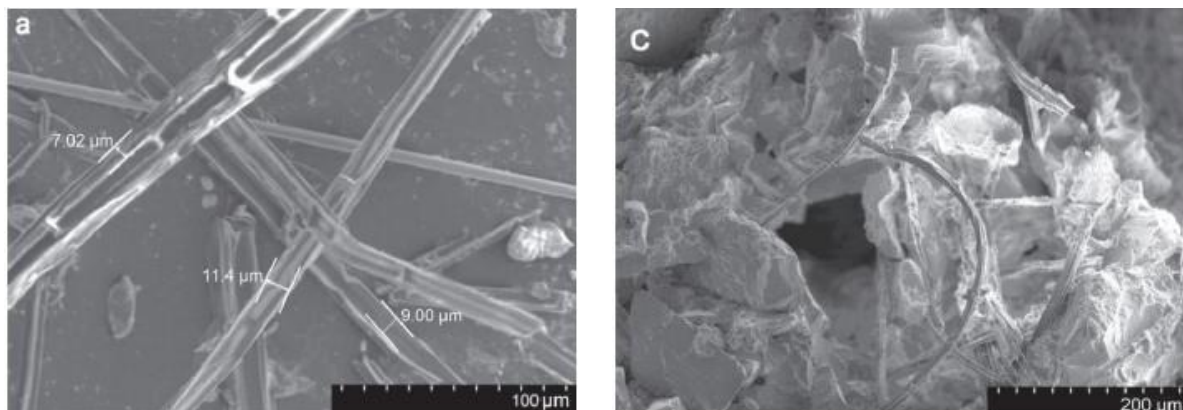
Po odvoskovaní zostali piliny primiešané do keramickej suspenzie celistvé (nevypálili sa ako ostatné vlákna), pretože teplota horenia pilín je väčšia ako teplota odvoskovania. Obsah pridaných pilín však nesmie prekročiť 5 hm %, pretože nadmerná pevnosť je nežiadúca, z dôvodu horšej rozpadavosti pri konečných úpravách. Pri teplote žihania sa už piliny vypálili a zostali na ich miestach dutiny, ktoré sú znázornené na obr. 40. V dôsledku väčšieho počtu pórov sa zvýšila priepustnosť a znížila pevnosť škrupiny za vypálenia. [53]



Obr. 40 Dutiny vytvorené po vyhorení pilín [53].

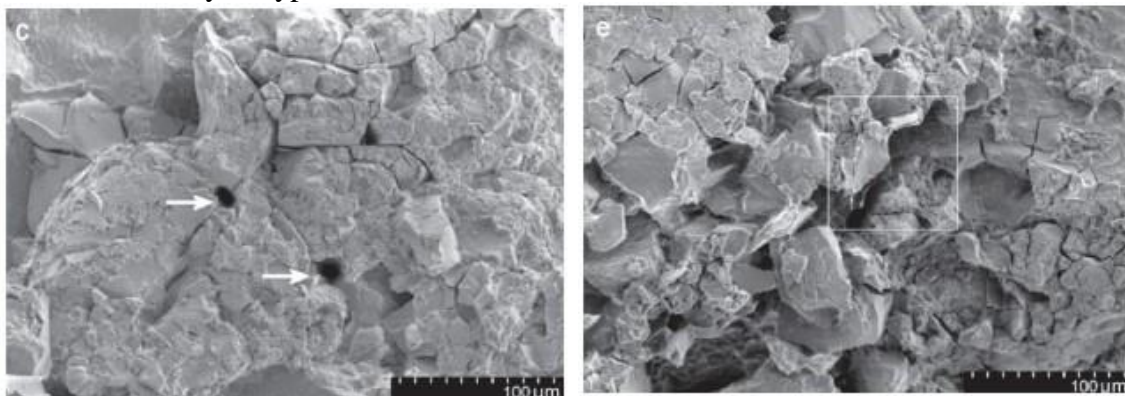
5.1.3 Vlákna z pálky širokolistej

Ako výstuže do škrupinových foriem možno pridať rôzne rastlinné vlákna a jedným z nich sú vlákna z pálky širokolistej. Obsah, dĺžka a priemer vlákien v pridaných do suspenzie má veľký vplyv na jej kvalitu. Do škrupinových foriem sú vhodnejšie krátke vlákna s menším priemerom a vynikajúcou rozpustnosťou vo vode, aby bol dosiahnutý hladký povrch. Na obr. 41 sú znázornené spevňujúce vlákna s priemerom približne 10 mikrometrov a dĺžkou 100-120 mikrometrov. Vlákna v škrupinách zlepšujú príľnavosť suspenzie, to by mohlo viesť k optimalizácii hrubšieho a rovnomernejšieho pokrytia pri tvorbe škrupiny. [54]



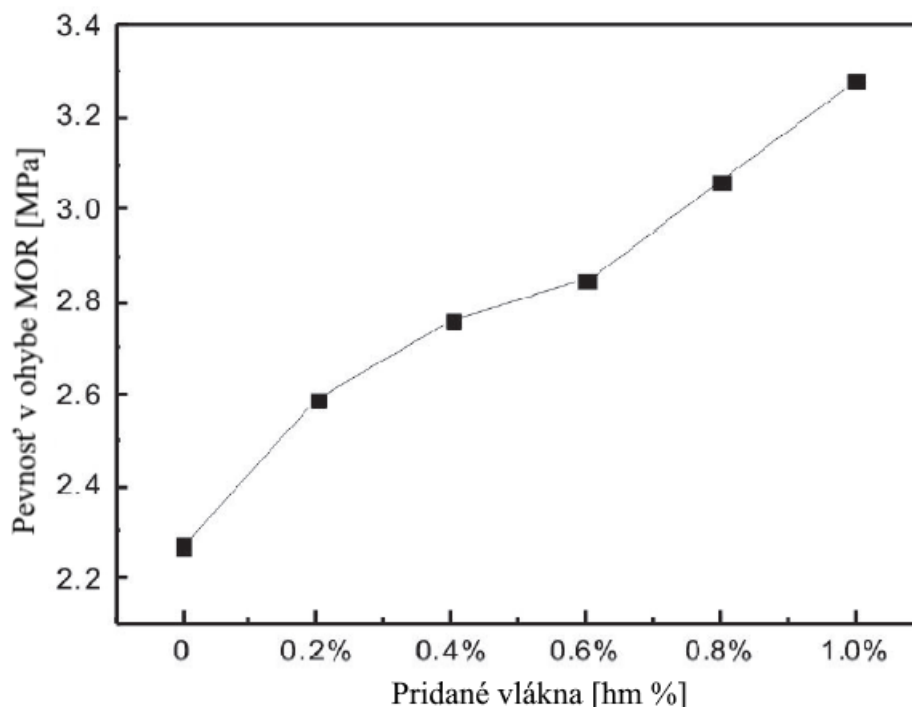
Obr. 41 Snímky vlákien z pálky širokolistej vytvorené pomocou SEM [54].

Po vypálení orbicových vláknach vzniká veľké množstvo mikrootvorov a pórov. Vypálené otvory, ktoré sú znázornené na obr. 42, blokujú šírenie trhlin, čo zabezpečuje väčšiu pevnosť po vypálení. Pri obsahu 0,6 hm % výstuhy výsledky dosahujú najlepšie pevnostné charakteristiky vo vypálenom stave. Keďže všetka vlhkosť a vlákna vo forme boli po spekaní odparené, zostali v škrupine otvory s priemerom približne 10 mikrometrov, čo zabezpečuje rýchly odvod plynu v procese plnenia. V škrupine modifikovanej vláknami je oveľa viac pórov a dutín vzniknutých vypálením vlákien. [54]



Obr. 42 Dutiny vytvorené po vypálení orbicových vlákn [54].

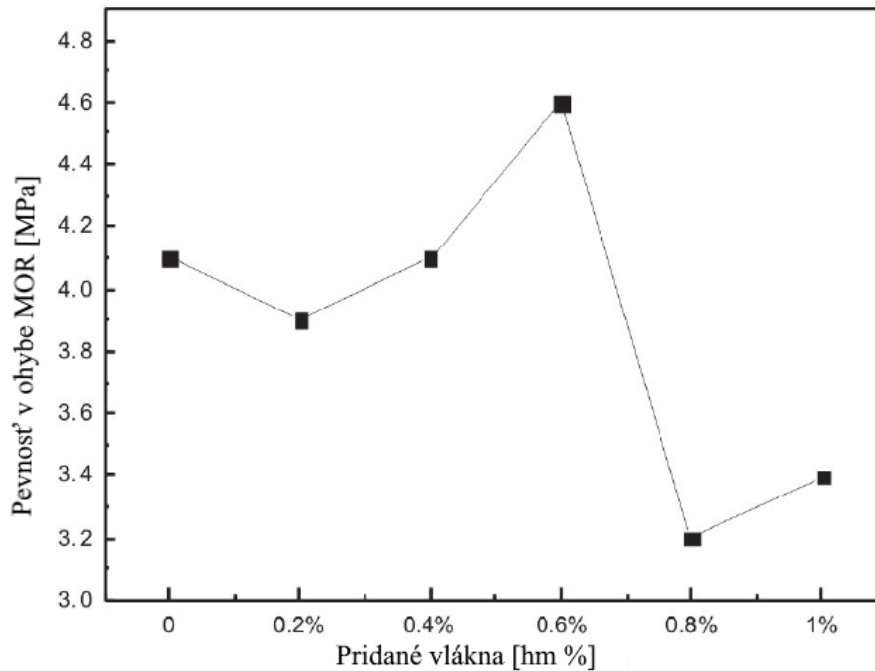
Pre škrupiny modifikované vláknami z páľky širokolistej boli prevedené pevnostné skúšky. Graf na obr. 43 znázorňuje pevnosť škrupiny za surova bez pridaných vlákn a s pridaním rôznych obsahov. Pridanie už malého množstva vlákn vykazuje zvýšenú pevnosť oproti škrupine bez výstuže. Pevnostné skúšky za surova vykazujú, že čím viac je pridaných vlákn do keramickej škrupiny, tým sa jej pevnosť zvyšuje. [54]



Obr. 43 Graf pevností za surova [54].

Na druhom grafe obr. 44 sú znázornené pevnosti škrupiny po vyžihaní (1000°C). Prírodné vlákna pridané do škrupiny zhoria a tým sa vytvorí dutiny v keramickej škrupine. Tieto voľné priestory vedú k zníženiu pevnosti škrupín pri vysokých teplotách. Výskumom sa však dokázalo,

že pridaním 0,6 hm% vláken sa pevnosť výrazne zvýšila, čo mohlo spôsobiť blokovanie trhlín vypálenými otvormi. [54]

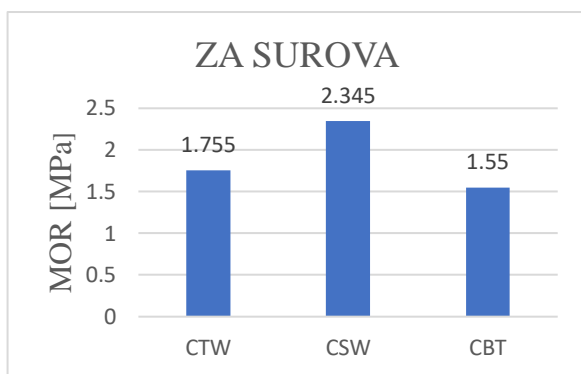


Obr. 44 Graf pevností za vypálena (1000°C) [54].

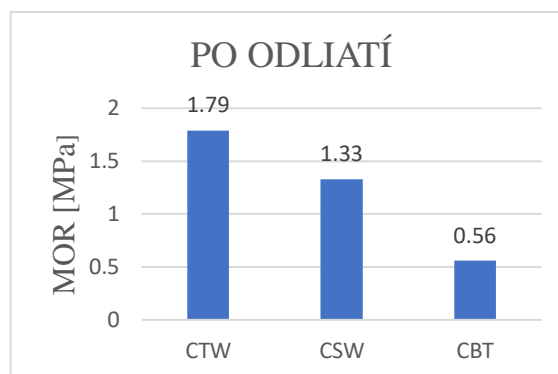
5.1.4 Zrecyklované odpadové materiály

1. Keramický odpad z fabriek na výrobu obkladačiek (CTW)
2. Keramický odpad zo sanitárnych produktov – vane , umývadlá... (CSW)
3. Keramický odpad keramických obkladov a pálených tehiel (CBT)

Všetky tri materiály sú lacnejšie a spĺňajú požadované zloženie na použitie ako sekundárnych obalov. [55]. Vzhľadom na presnosť a hladký povrch konečného odliatku, bola zachovaná primárna vrstva zložená zo zirkónovej múčky 300 mesh ako plniva a koloidného roztoku oxidu kremičitého ako spojiva. V štúdiu [55] sa ako spevňujúce materiály použili CTW, CSW a CBT. Na škrupinách sa vykonali pevnostné skúšky za surova, ktoré sú znázornené na obr. 45. Pevnostné skúšky vykonané po odliatí a schladnutí kovu sú znázornené na obr. 46. Z pevnostných charakteristík vyplýva, že najvyššie pevnosti za surova mala škrupina vytvorená z materiálu CSW. [55]



Obr. 45 Porovnanie pevností škrupín za surova [55].



Obr. 46 Porovnanie pevností škrupín po vyžihaní [55].

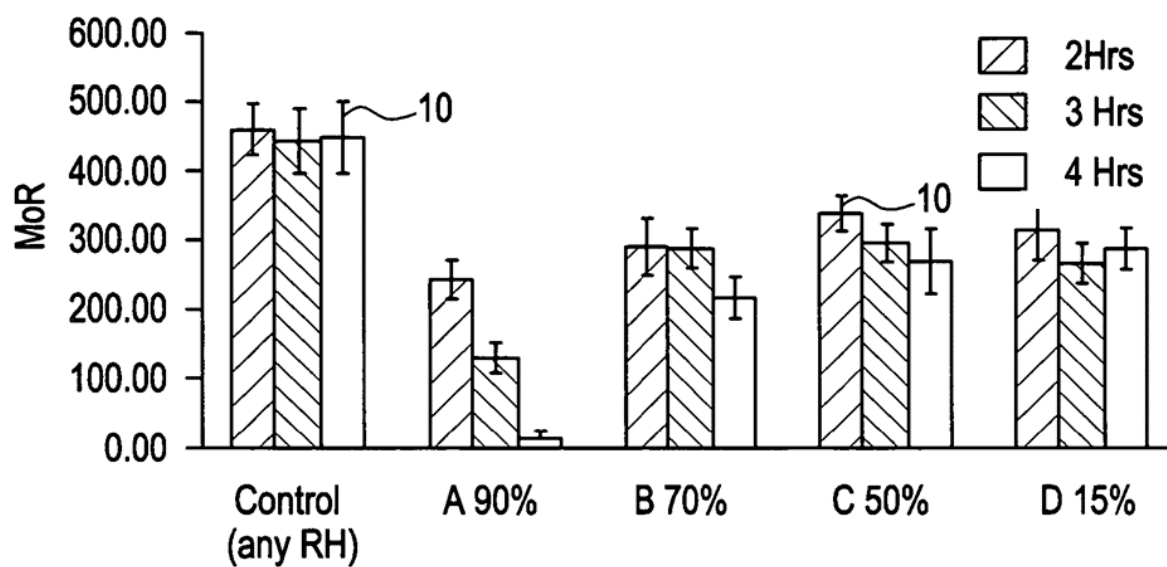
5.2 Modifikácia solami alkalických zemín

Podľa štúdie [56] bolo dokázané, že pridanie soli alkalického kovu alebo kovu alkalických zemín do aspoň jednej z vrstiev škrupiny môže do určitej miery oslabiť škrupinu bez poškodenia odliatku. Medzi soli kovov alkalických zemín, ktoré sa môžu použiť v praxi na vytvorenie škrupiny pri technológii vytaviteľného modelu, patria okrem iného uhličitan vápenatý, síran vápenatý, uhličitan vápenato-horečnatý, uhličitan horečnatý, síran horečnatý, uhličitan stronciový, uhličitan sodný, octan draselný a ich zmesi. Uprednostňuje sa však uhličitan vápenatý, ktorý zlepšuje odstraňovanie škrupiny z odliatku. [56]

Na zoslabenie škrupín sa môže použiť oxid kovov alkalických zemín, najmä uhličitan vápenatý, ktorý sa môže najskôr pridať do škrupiny pred výpalom vo forme soli, ako je vápenatá soľ, uhličitan vápenatý, ako zložka do posypového materiálu, napríklad vytvárajúci oxid vápenatý počas výpalu. V inom prevedení sa môže použiť horčíková soľ. Soľ alkalického kovu alebo kovu alkalických zemín sa pridáva aspoň do jednej vrstvy obalu škrupiny, aby sa dosiahol požadovaný zoslabujúci účinok, ktorý sa pri vypálení zvyčajne zväčšuje. Takéto pridanie soli kovov alkalických zemín, ako je uhličitan vápenatý, pridaný do škrupiny pri metóde technológii vytaviteľného modelu, môže mať oslabujúci účinok, ktorý vedie k dvoj- až trojnásobnému zvýšeniu rýchlosti narušenia vypáleného škrupinového obalu, ktorý obklopuje schladnutý odliatok. [56]

Zoslabenie škrupín sa ešte znásobuje hydratáciou. Hydratácia je založená na rozprašovaní vody alebo ponorením škrupiny nádoby s vodou. Pre ešte väčší účinok môže táto hydratácia prebiehať pri zvýšenej teplote aspoň asi 100 °C a aspoň 50 % relatívnej vlhkosti. Hydratovaním sa pevnosť škrupiny zníži, a tým sa uľahčí jej odstraňovanie po odliatí. Krok hydratácie sa zvyčajne aplikuje po stuhnutí roztaveného kovu v škrupine, tesne pred odstraňovaním škrupiny z finálneho odliatku. [56]

Na obr. 47 je znázornený graf, ktorý porovnáva škrupiny, ktoré obsahujú uhličitan vápenatý (A-D) so škrupinou, kde bol uhličitan vápenatý nahradený mletým oxidom kremičitým (control). Percentá za každým písmenom (A – D) popisujú relatívnu vlhkosť vzduchu, v ktorom sa jednotlivé vzorky ponechali 2 – 4 hodiny. Z týchto údajov je možné vidieť, že škrupiny, ktoré obsahujú vápnik, sú výrazne citlivé na vlhký vzduch, pričom citlivosť má tendenciu rásť s relatívnou vlhkosťou vzduchu, ktorej sú vystavené. Napríklad 4 hodiny vystavenia vzduchu s 90 % relatívnou vlhkosťou spôsobí, že sa škrupina po odliatí takmer úplne rozpadne. [56]



Obr. 47 Graf závislosti stupňa zvlhčenia na pevnosť škrupiny po odliatí [56].

6 NÁVRH METODIKY TESTOVANIA ROZPADAVOSTI

Na prevedenie experimentálnej časti bol zvolený vzorový odliatok, ktorý má vo firme MoraviaTech a.s. najväčšie problémy pri odstraňovaní škrupiny po odliatí. Metodika merania množstva odstránenia keramickej škrupiny bola zvolená na základe merania hmotností. Sledovanie množstva opadanej škrupiny sa zaznamenávalo v rôznych časových fázach.

6.1 Skúšobné teleso

Prvým krokom bolo pripravenie voskových modelov vzorového odliatku (obr. 48). Tie boli pripravené naplnením matečnej formy pomocou pneumatického vstrekovacieho stroja. Vosk bol vstrekovaný pri teplotách 52°C do delených lisovacích foriem pomocou špeciálne navrhnutého zariadenia. Následne boli zostavené do skupiny na vtokový kôl do tvaru takzvaného stromčeka (obr. 49). Voskové modely sa na kôl prilepili pomocou roztavenia vosku v miestach, kde mali byť jednotlivé diely k sebe prilepené. Vosk sa na rozhraní dvoch komponentov rýchlo roztavil a jednotlivé diely sa k sebe pritlačali, kým vosk opäť nezatuhol. Spoj sa potom vyhladil pomocou spájkovačky. Spoje sa potom uhladili, aby boli pevné a úplne utesnené bez podrezaní. Takisto dbalo na to, aby nedošlo k poškodeniu vzorov alebo rozstrekovaniu kvapiek roztaveného vosku na montované vzory. Povrch voskových stromčekov sa pred namáčaním v keramickej suspenzii očistil, namočením v jarovej vode, aby sa odstránilo mazivo použité na vstrekovanie, uvoľnené kusky vosku a iné nečistoty. Po tomto očistení sa nechali jednotlivé zostavy vysušiť pri izbovej teplote.



Obr. 48 Voskový model vzorového odliatku.



Obr. 49 Modely zostavené do stromčeka.

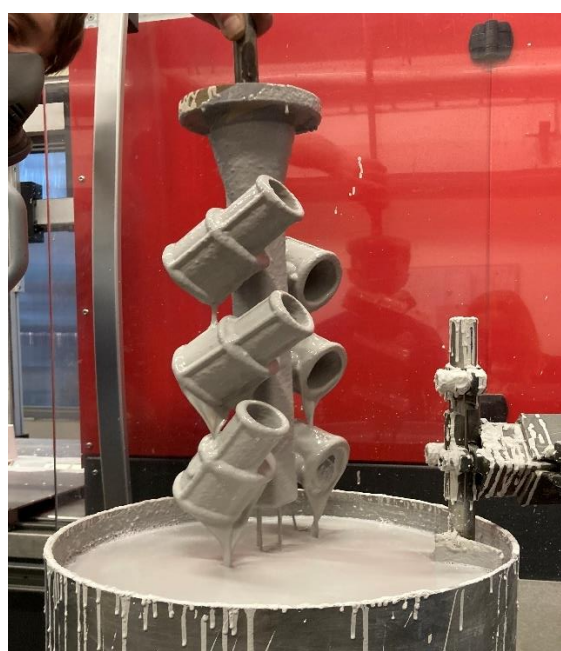
6.2 Príprava keramickej škrupiny

Keramický obal bol vytvorený ponorením zostavy voskového modelu do pripravenej keramickej suspenzie. Tá sa skladala z koloidného roztoku oxidu kremičitého a vhodným plnivom. Primárna suspenzia pre tento experiment pozostávala z koloidného roztoku oxidu kremičitého ako spojiva, zo zirkónu ako žiaruvzdorného plniva. Ako posypový materiál sa použil zirkón. Sekundárna suspenzia bola tvorená opäť koloidným roztokom oxidu kremičitého ako spojiva, zirkónu ako žiaruvzdorného plniva. Posypovým materiálom bol kremeň 0,28 – 0,32 mm. Zosilňovacie suspenzie boli tvorené rovnakým spojivom ako predchádzajúce, ako

plnivo bol použitý lupok A111. Posypový materiál bol kremeň väčšej zrnitosti ako predchádzajúci (0,6 – 1,2 mm). Pred každým obaľovaním bola zmeraná viskozita suspenzie pomocou výtokového pohára Zahn 5. Po vnorení do namiešanej suspenzie (obr. 50) sa so stromčekom otáčalo tak, aby mohol uniknúť vzduch zo všetkých otvorov, kútov a drážok. Takto namočená zostava sa nechala krátku dobu okvapkať (obr. 51). Počas tohoto procesu sa so stromčekom manipulovalo tak, aby sa dosiahlo čo najrovnomernejšieho pokrytia bez kvapiek a stekania. Potom sa navlhčená vzorová zostava posypala keramickým posypom vhodnej zrnitosti. Zostavou sa opäť vykonávali priečne a rotačné pohyby tak, aby bol posypový materiál zachytený rovnomerne po celom vzorovom modeli. Následne sa takto pripravený prvý obal nechal dostatočne preschnúť. Sušenie sa vykonalo na vzduchu pri izbovej teplote s cirkulujúcim vzduchom a kontrolovanou teplotou (22 °C). Rovnakým spôsobom sa tvorili ďalšie obaly, kým sa nevytvorila požadovaná hrúbka keramickej škrupiny.



Obr. 50 Ponáranie modelovej zostavy v suspenzii.



Obr. 51 Okvapávanie namočenej zostavy.

Pre určenie rozpadavosti keramickeho obalu po odliatí boli zrovnávané tri rôzne varianty. Tie vznikli modifikáciou bežne používanej keramickej suspenzie v MoraviaTechu. Rozdiely medzi jednotlivými variantami sú znázornené v tab. 2.

Tab. 2 Varianty pre určenie rozpadavosti keramickeho obalu

varianta A	bežne používaná suspenzia vo firme MoraviaTech
varianta B	suspenzia namiešaná podľa odporúčenia od výrobcu so zníženým obsahom pevných látok v spojive a obsahu žiaruvzdorných látok v spojive
varianta C	pridanie nylonových vlákien do spevňujúcej suspenzie

• VARIANTA A

Keramická suspenzia vo variante A bola vytvorená podľa bežnej prevádzky vo firme MoraviaTech a.s. Bola namiešaná podľa doporučení od výrobcu a podľa skúseností zlievarne upravená tak, aby nedochádzalo k vysokej zmätkovitosti. Zloženie jednotlivých vrstiev je znázornené v tab. 3. Primárna vrstva bola pripravená podľa bežného spôsobu obalovania. Potom bola pred druhým obalom aplikovaná metóda takzvaného predbežného zvlhčovania. Toto predvlhčenie sa vykoná ponorením suchého primárneho obalu do roztoku pozostávajúceho z vodného spojiva na báze koloidného oxidu kremičitého – čistého Remasolu SP ultra približne na 2-3 sekundy. Po vybratí sa stromček ihneď ponorí do zarobenej sekundárnej suspenzie. V niektorých štúdiách je uvedené, že je vhodnejšie predvlhčovať v zriadenom koloidnom oxide kremičitom s destilovanou vodou v pomere 1:1. Tento postup sa aplikuje za cieľom zlepšenia príľnavosti medzi jednotlivými vrstvami najmä v zložitých oblastiach, za účelom zvýšenia pokrytia povrchu a zníženia defektov, ako je delaminácia po nedostatočnom zmočení predchádzajúcej vrstvy. Vzhľadom na vyššie viskozity všetkých suspenzií, vo firme stačilo modelovú zostavu obaliť iba šiestimi obalmi, čo šetrí čas potrebný na sušenie jednotlivých vrstiev medzi ďalšími obalmi.

Tab. 3 Zloženie keramických škrupín pre variantu A.

Varianta A				
Poradie obalov		1. obal	2. obal	3.- 6. obal
Suspenzia	spojivo	Remasol SP ultra	Remasol SP ultra	Remasol SP ultra
	plnivo	Zirkón 200 mesh	Zirkón 200 mesh	Lupok A111
	aditíva	zmáčadlo		
	d'alsie		predvlhčenie	
Posyp		Zirkón 110 mesh	Kremeň (0,28-0,32)	Kremeň (0,6-1,2)

V školskej laboratórií boli prevedené základné skúšky keramickej suspenzie ako je hustota, celkový obsah pevných látok v spojive (Binder solid) a celkový obsah žiaruvzdorných látok (Total solid). Prevedenie jednotlivých testov je opísané v kapitolách 3.1.1 – 3.1.4. Výsledky skúšok sú znázornené v tab. 4.

Tab. 4 Výsledné hodnoty z jednotlivých testov keramickej suspenzie

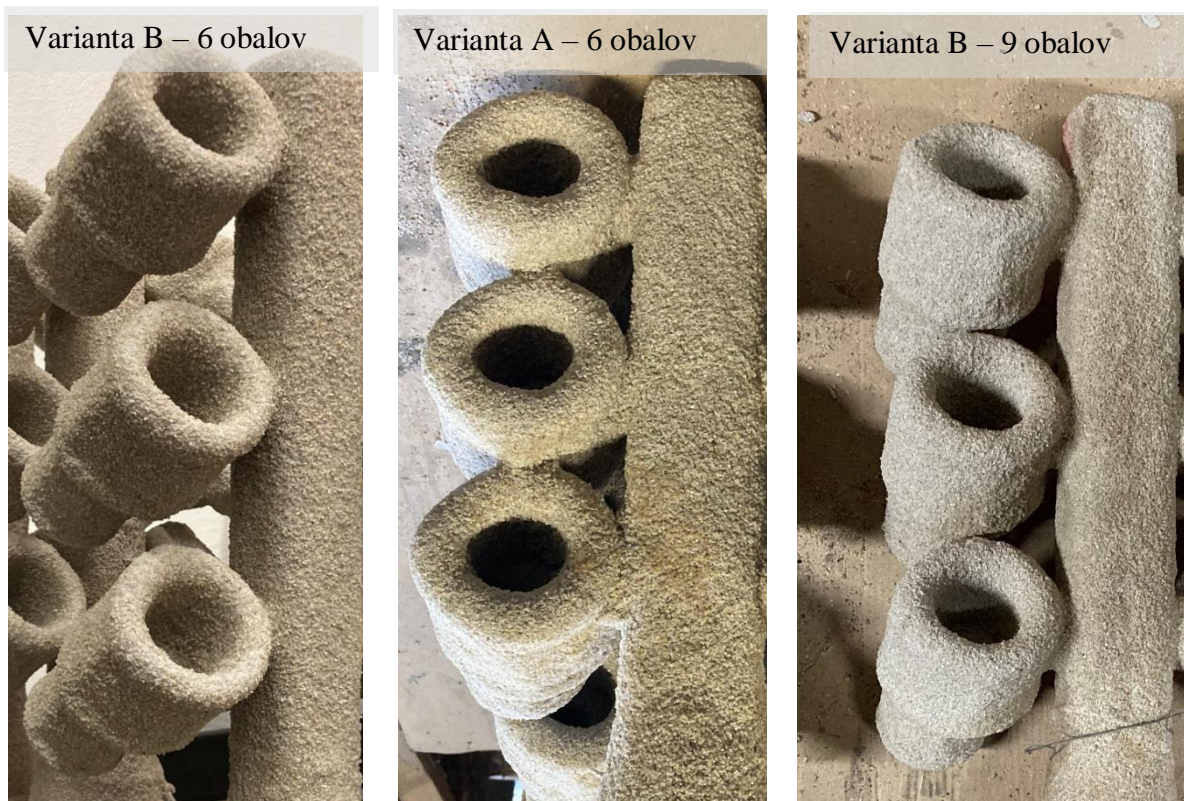
	Vrstva	Hustota [g/cm ³]	Binder solid	Total solid	Viskozita [sec]
A	primár	3,02	35,28	88,11	18:55
	sekundár	2,95	32,94	86,87	16:46
	zosilovacie	1,86	30,85	75,78	15:33

• VARIANTA B

Varianta B bola vytvorená podľa doporučení od dodávateľa (tab. 5). Primárna vrstva bola namiešaná v pomere 1:5 spojivo a plnivo v tomto poradí. Potom sa suspenzia nechala stabilizovať približne dva dni. Po namiešaní a stabilizovaní bola nameraná viskozita až na 26,20 sekundách, čo bola dvojnásobná hodnota od doporučenej, preto sa suspenzia doriedila vhodným obsahom destilovanej vody. Sekundárna suspenzia mala byť namiešaná v pomere 1:4,4 spojivo – zirkón, ale vzhľadom na podmienky pri obalovaní bola primárna suspenzia doriedená destilovanou vodou, aby spĺňala predpísanú viskozitu. Obalovanie voskového modelu v primárnej suspenzii a následne posypanie prebehlo podľa štandardného postupu. Po

namočení prvého modelového stromčeka v pripravenej sekundárnej suspenzii nastali komplikácie. Pri počiatkovej viskozite (12 sekúnd na Zahnovom poháriku 5) boli zaznamenané určité nenavlhčenia predchádzajúceho obalu, čo malo za následok vytvorenie veľkého množstva vzduchových bublín a s tým spojenú zlú priľnavosť na predchádzajúci obal. Vzhľadom k tomu, že ďalším rozdielnym faktorom bolo vynechať operáciu predvlhčenia, ktorú aplikujú vo firme, na zlepšenie priľnavosti medzi jednotlivými vrstvami sa rapídne znížila viskozita pomocou destilovanej vody na 5 sekúnd pri Zahnovom pohári 5. Vďaka zníženiu viskozity sekundárna suspenzia lepšie prenikla do poréznej primárnej vrstvy a vyplnila dutiny medzi žiaruvzdornými posypovými časticami. Všeobecne platí, že suspenzia pre sekundárne nátery môže byť redšej konzistencie, aby sa zlepšilo namáčanie a okvapkovanie.

Po vytvorení šiestich obalov, tak ako bežne vyrábajú vo firme, bola spozorovaná veľká odchýlka v hrúbke nabalených vrstiev (obr. 52). To bolo spôsobené výrazným znížením viskozity jednotlivých suspenzií. Keďže zámerom bolo zlepšiť rozpadavosť foriem, menšia hrúbka nabalených vrstiev by mohla mať pozitívny vplyv na rýchlosť ich odstraňovania. Vzhľadom na skúsenosti zamestnancov, ktorí predpokladali, že takto oslabená škrupina nevydrží tlak kovu a rozpadne sa pri odlievaní, bol vytavený a odliaty iba jeden vzorový stromček.



Obr. 52 Porovnanie hrúbok škrupín medzi variantou A a B v závislosti na počte obalov.

Počas procesu autoklárovania, keramická škrupina absorbovala vosk z voskového modelu. Absorbovanie vosku bolo na toľko rozsiahle, že až na povrchu škrupiny bolo vidieť presiaknutý vosk (obr. 53 a obr. 54). Presiaknutie vosku predikovalo narušenie škrupiny a následné prasknutie počas odlievania. Vytavená škrupina sa vložila do žihacieho tunela a po štandardnom vyžíhaní sa do nej začal nalievať kov. Tak ako sa predpokladalo, oslabená škrupina praskla počas odlievania vplyvom tlaku, ktorým na ňu pôsobil roztavený kov. Z tohto dôvodu sa na ostatné škrupiny vyrobené podľa odporúčenia od výrobcu (varianta B) pridali ďalšie tri zosilňujúce obaly.



Obr. 53 Presiaknutý vosk na povrchu škrupiny.



Obr. 54 Detailné zobrazenie presiaknutého vosku.

Tab. 5 Zloženie keramických škrupín pre variantu B

Varianta B				
Poradie ovalov		1. obal	2. obal	3.- 9. obal
Suspenzia	spojivo	Remasol SP ultra	Remasol SP ultra	Remasol SP ultra
	plnivo	Zirkón 200 mesh	Zirkón 200 mesh	Lupok A111
	aditíva	zmáčadlo		
	d'alsie	destilovaná voda	destilovaná voda	destilovaná voda
Posyp		Zirkón 110 mesh	Kremeň (0,28-0,32)	Kremeň (0,6-1,2)

Rovnako ako pri variante A, aj tu boli v školskej laboratórii prevedené základné skúšky keramickej suspenzie. Výsledky týchto skúšok sú znázornené v tab. 6.

Tab. 6 Výsledné hodnoty z jednotlivých testov keramickej suspenzie

	Vrstva	Hustota [g/cm ³]	Binder solid	Total solid	Viskozita [sec]
B	primár	2,99	30,55	87,52	12:30
	sekundár	2,86	25,92	85,13	5:02
	zosilnovacie	1,8	28,95	64,47	6:46

• VARIANTA C

Varianta C (tab. 7) bola modifikovaná nylonovými vláknami. Prvé dva obaly (suspenzia so zirkónovou múčkou) boli vytvorené rovnako ako vo variante B. Do ďalších - spevňujúcich obalov boli pridané nylonové vlákna v pomere na 1 liter spojiva 20 gramov vlákien. Vlákna sa zamiešali v čistom spojive a boli pridané do pripravenej suspenzie. Keďže ani tieto škrupiny nedosahovali po 6 obaloch dostatočnú hrúbku, boli pridané ďalšie tri spevňujúce obaly, aby boli dostatočne pevné pri liatí kovu.

Tab. 7 Zloženie keramických škrupín pre variantu C

Varianta C					
Poradie obalov		1. obal	2. obal	3.- 9. obal	
Suspenzia	spojivo	Remasol SP ultra	Remasol SP ultra	Remasol SP ultra	
	plnivo	Zirkón 200 mesh	Zirkón 200 mesh	Lupek A111	
	aditíva	zmáčadlo		nylonové vlákna	
	d'alsie	destilovaná voda	destilovaná voda		
Posyp		Zirkón 110 mesh	Kremeň (0,28-0,32)	Kremeň (0,6-1,2)	

Opäť boli prevedené základné skúšky suspenzií (tab. 8). Keďže sa vlákna zhľukujú, viskozitu nebolo možné presne zmerať pomocou Zahnovho pohárika, preto sme použili Flow cup.

Tab. 8 Výsledné hodnoty z jednotlivých testov keramickej suspenzie

	Vrstva	Hustota [g/cm ³]	Binder solid	Total solid	Viskozita [sec]
C	primár	2,99	30,55	87,52	12:30
	sekundár	2,86	25,92	85,13	5:02
	zosilnovacie	1,76	27,06	59,58	25 (flow cup)

6.3 Skúšky pevnosti v ohybe

Pevnosť keramickej škrupiny sa určuje meraním modulu pružnosti pri pretrhnutí (MOR). Jednotlivé skúšobne kusy (približne 100 mm x 10 mm) boli vyrezané z obalených vtokových kôlov (obr. 55), pílou s diamantovým kotúčom, tým sa vynechal proces autoklávovania, ktorý by mohol zmeniť charakteristiky daného vzorku. Obaly na vtokovej sústave boli pripravené zároveň s obalovanými stromčekmi, aby čo najviac charakterizovali škrupinu na vzorových modeloch. Bolo vyrezaných 9 vzorkov z každej varianty (A,B,C). Tie boli následne rozdelené do troch skupín. Jedna skupina vzoriek bola určená na skúšku pevnosti za surova, ktorá sa merala za účelom zistenia, ako dobre sú spevnené väzby medzi oxidom kremičitým a žiaruvzdorným materiálom. Druhá skupina vzoriek bola určená na meranie pevnosti za tepla. Táto pevnosť je ukazovateľom schopnosti škrupiny udržať kov pri odlievaní. Posledné vzorky sa podrobili rovnakým podmienkam výpalu a chladnutiu. Po vychladnutí vzorkov sa merala zvyšková pevnosť. Čím bude táto pevnosť nižšia, tým bude odstránenie škrupiny po schladnutí odliatku jednoduchšie.



Obr. 55 Vyrezávanie vzorkov z obaleného vtokového kôlu..

Na vyhodnotenie mechanických vlastností foriem sa vykonali trojbodové ohybové skúšky na surových a vyžihovaných vzorkách pri izbovej teplote. Vzorky boli vložené do stroja MTS Criterion – Model 43 (obr. 56) na skúšanie pri konštantnej rýchlosti zaťaženia 1 mm/min až do zlyhania. Všetky vzorky, ktoré boli testované, sa zlomili v strede alebo blízko stredu, takže nebola potrebná žiadna korekcia. Ďalej boli skúmané mechanické vlastnosti pri žihacej teplote (1000 °C) tak, že k zariadeniu MTS Criterion – Model 43 bola primontovaná pec (obr. 57).



Obr. 56 Zariadenie na meranie MOR pri teplote okolia.



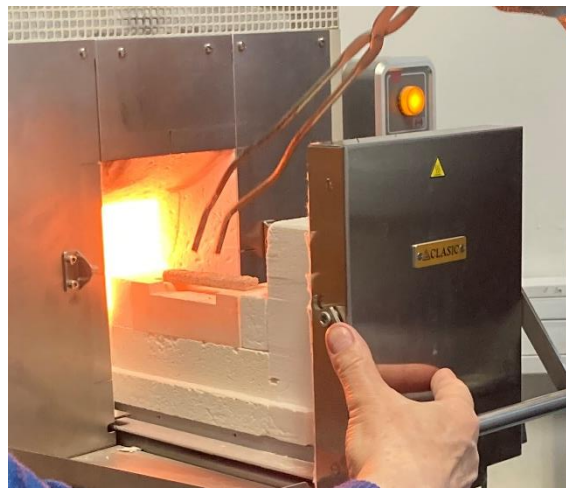
Obr. 57 Zariadenie na meranie MOR za zvýšených teplôt.

Meranie mechanických vlastností za surova a po vyžihaní a schladnutí je znázornené na obr. 58. Vzorka bola vložená do stredu na dve podpory primárnou vrstvou nadol. Zvrchu do stredu vzorky pôsobila konštantná sila, až do porušenia skúšobného telesa.

Uloženie skúšobných vzoriek na meranie pevností za zvýšených teplôt je znázornené na obr. 59. Vzorka sa umiestnila pomocou klieští na dve podpory a celý mechanizmus sa zasunul do pece.



Obr. 58 Uloženie skúšobného vzorku do meracieho zariadenia pri teplote okolia.



Obr. 59 Uloženie skúšobného vzorku do meracieho zariadenia za zvýšenej teploty.

Pred vložením do meracieho stroja boli na vzorkách zmerané základné rozmery ako je dĺžka, šírka a hrúbka. Kvôli nerovnomernému povrchu vzniknutému počas obalovania zrnitými keramickými materiálmi bolo zložité zmerať hrúbku daného vzorku, preto bola snaha zmerať ju na najreprezentatívnejšom mieste – strede vzorku. Následne boli vzorky vložené do meracieho zariadenia. Pre správnosť výsledkov sa každý typ vzoriek (A,B,C), pri každej metóde (za surova, za tepla, po vyžíhaní a schladnutí), previedla trikrát a z výsledných hodnôt sa vypočítal aritmetický priemer.

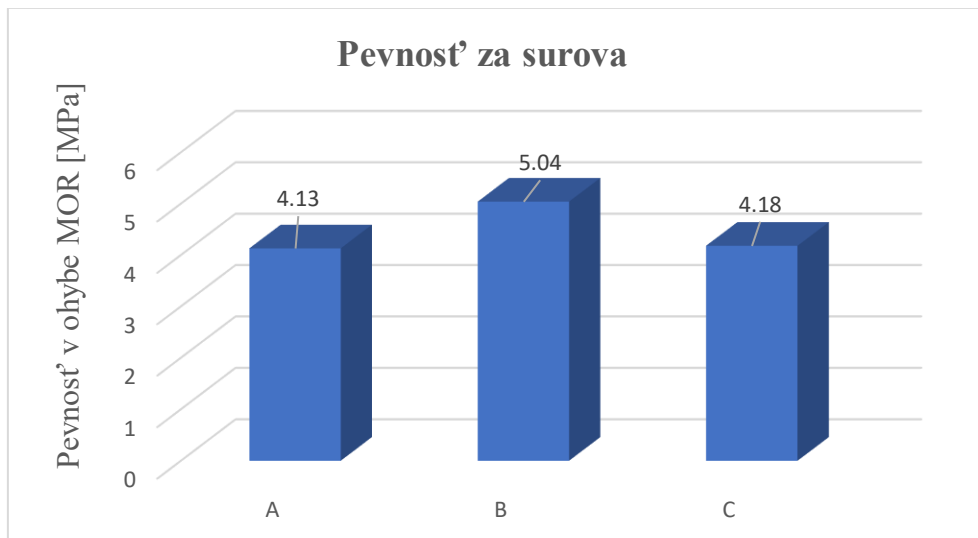
Testovanie ohybu za surova bolo prevedené tak, že vzorky vysušené na vzduchu boli vložené do zariadenia obr. 58. Skúška sa vykonala pri teplote okolia bez akéhokoľvek zahrievania vzorky. Výsledné hodnoty sú znázornené v tab. 9.

Tab. 9 Namerané hodnoty pevností za surova.

označenie vzorku	dĺžka l [mm]	šírka b [mm]	výška h [mm]	hmotnosť m [g]	MOR [MPa]	Ø MOR [MPa]	σ ² MOR [MPa]
1 - A	100	17,90	8,29	24,30	4,18	4,13	0,01
2 - A	100	15,87	9,14	25,90	4,00		
3 - A	100	17,00	8,22	25,10	4,22		
1 - B	100	15,50	9,10	24,10	4,42	5,04	0,38
2 - B	100	16,14	8,41	25,10	5,04		
3 - B	100	15,52	7,82	22,20	5,65		
1 - C	100	15,30	7,50	21,80	5,00	4,18	0,58
2 - C	100	15,61	7,04	20,60	3,49		
3 - C	100	14,90	8,04	21,70	4,06		

Obr. 60 graficky zobrazuje výsledky pevnostných skúšok všetkých troch obalových typov. Škrupina vytvorená podľa odporúčenia od dodávateľa (znížením binder solids) (varianta B) vykazovala zvýšenie pevnosti až o 22% v porovnaní so škrupinou (varianty A) vyrobenou vo firme. Pevnosti škrupín pri znížených obsahoch tuhých častíc v spojive, by mali mať najnižšie pevnosti, pri tomto experimente mali najvyššie. To mohlo byť spôsobené namočením jednotlivých obalov v suspenzii na dlhší čas, ako je odporúčené. Počas tejto doby suspenzia

penikla do predchádzajúcich vrstiev a opätovne ich navlhčila. Pri sušení zostalo spojivo v dutinách predchádzajúcich vrstiev a tým škrupina nadobudla väčšiu pevnosť. Z dôvodu spätného nasiaknutia predchádzajúcej vrstvy sa predĺžili časy sušenia medzi jednotlivými vrstvami. Toto nadmerné sušenie tiež zvýšilo pevnosť škrupiny, pretože pri ďalšom namočení do suspenzie mala škrupina zväčšené póry, do ktorých sa mohla suspenzia znovu nasiaknuť. Po pridaní vlákien sa pevnosť za surova zvýšila iba o zanedbateľných 1,2% .



Obr. 60 Porovnanie výsledkov pevností za surova.

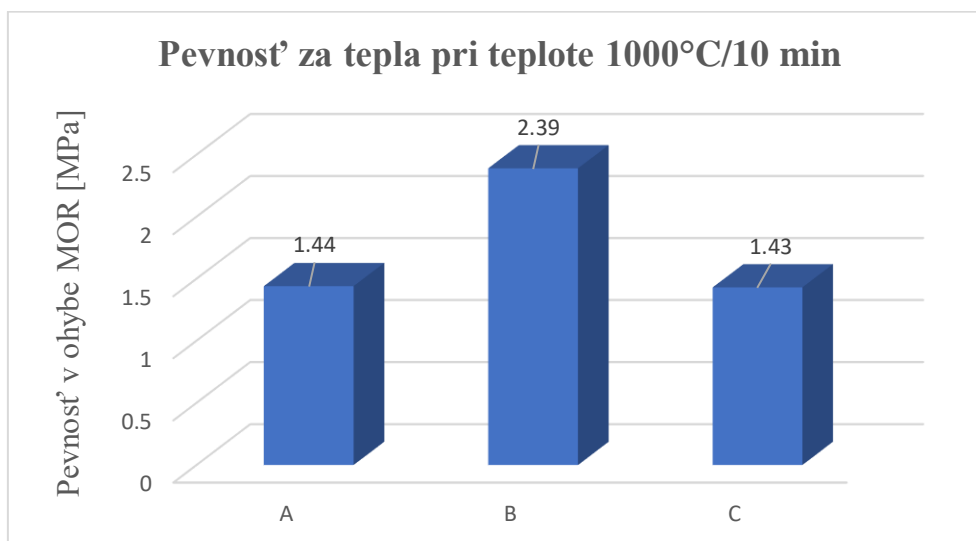
Analýza pevností za tepla sa dosiahla zahriatím keramickej vzorky na 1000 °C po dobu 10 minút. Bohužiaľ, kvôli obmedzeniam skúšobného zariadenia nebolo možné merať pevnosť v ohybe za zvýšených teplôt podľa správnosti, to je pri pomalom zohrievaní na teplotu 1000 °C, výdrži 30 min na tejto teplote a následným spustením merania. Vzhľadom k tomu, že vzorky za izbovej teploty boli vložené do vyhriatej pece na 1000°C, boli vystavené tepelnému šoku, vplyvom rýchlej zmeny teploty. Keramickej škrupina bola tvorená kremennými ostrivami, ktoré sú najviac náchylné na tepelný šok. Z tohto dôvodu došlo k skresleniu výsledných hodnôt pevností, ktoré sú znázornené v tab. 10.

Tab. 10 Namerané hodnoty pevností za tepla.

označenie vzorku	dĺžka l [mm]	šírka b [mm]	výška h [mm]	hmotnosť m [g]	MOR [MPa]	σ MOR [MPa]	σ ² MOR [MPa]
1 - A	100	16,75	9,24	28,20	1,26	1,44	0,03
2 - A	100	16,21	9,24	27,80	1,48		
3 - A	100	15,89	8,31	23,50	1,59		
1 - B	100	15,55	7,37	24,30	2,39	2,39	0,03
2 - B	100	14,18	7,32	20,90	2,22		
3 - B	100	15,18	7,43	24,10	2,56		
1 - C	100	15,66	7,30	21,30	1,86	1,47	0,19
2 - C	100	15,91	7,82	23,00	0,99		
3 - C	100	15,67	7,50	22,50	1,55		

Napriek takto upravenému meraniu, keramickej škrupina vytvorená podľa odporúčenia od výrobcu opäť dosahovala najväčšie pevnosti (obr. 61), dokonca o 66 % viac oproti pevnostiam zmeraných na vzorke škrupiny vyrobenej vo firme MoraviaTech. Pevnosť škrupiny

s pridanými vláknami bola zrovnateľná s pevnosťami škrupiny vyrobenej v bežnej prevádzke firmy.



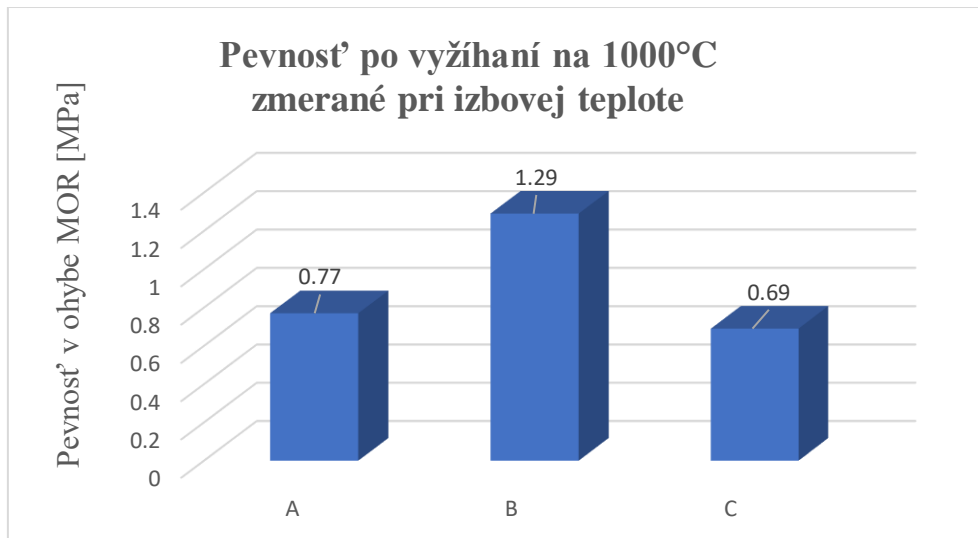
Obr. 61 Porovnanie výsledkov MOR pri zvýšenej teplote.

V tab. 11 sú zobrazené výsledky zvyškovej pevnosti. Vzorky na určenie tejto pevnosti boli zahrievané rýchlosťou 4°C/ min do 600°C, potom rýchlosťou 7°C/ min do 1000°C, kde boli vzorky udržiavané pri konštantnej teplote počas 30 min a následne boli vzorky ponechané vychladnúť späť na izbovú teplotu.

Tab. 11 Namerané hodnoty pevností po vyžihaní a schladnutí na izbovú teplotu.

označenie vzorku	dĺžka l [mm]	šírka b [mm]	výška h [mm]	hmotnosť m [g]	MOR [MPa]	σ MOR [MPa]	σ ² MOR [MPa]
1 - A	100	15,26	9,90	26,00	0,46	0,77	0,10
2 - A	100	16,30	7,95	22,30	1,08		
3 - A	100	15,45	9,81	27,30	0,78		
1 - B	100	15,24	7,28	20,70	1,62	1,29	0,09
2 - B	100	14,86	8,78	23,10	1,02		
3 - B	100	15,57	8,01	21,90	1,24		
1 - C	100	16,72	9,20	24,40	0,37	0,69	0,08
2 - C	100	16,94	8,37	23,10	0,81		
3 - C	100	14,82	7,86	20,10	0,88		

Najvyššiu zvyškovú pevnosť (obr. 62), dokonca až o 67,5% väčšiu oproti škrupine vyrobenej v prevádzke MoraviaTech, vykazovala opäť škrupina varianty B. Naopak menšiu zvyškovú pevnosť po výpale mala škrupina s pridanými nylonovými vláknami. Oproti štandardnej škrupine sa jej pevnosť znížila o 10%. Vzhľadom k tomu, že nižšia zvyšková pevnosť sa vzťahuje na jednoduchosť odstránenia keramickej škrupiny po odliatí, môže byť modifikácia nylonovými vláknami prospešná pre túto prácu.



Obr. 62 Porovnanie výsledkov MOR po vypálení a schladnutí.

6.4 Vytavovanie vosku

Vytavenie vosku znamená odstránenie voskového modelu z hotovej keramickej škrupiny. Po úplnom vysušení a vytvrdnutí sa formy obrátili hore dnom a umiestnili sa do autoklávu (obr. 63). Praskanie foriem je čiastočne spôsobené procesom odvoskovania. Používa sa mnoho spôsobov na odstránenie vosku. Aby sa podarilo vosk dobre odstrániť, musí sa dostatočne zahriať vonkajšia časť keramickej škrupiny, ktorá roztaví priliehajúci vosk k prvej obalovej vrstve formy skôr, ako zbytok vosku. Roztavený vosk sa pri vhodných podmienkach postupne vsiakne do keramickej škrupiny, čo umožní voľné rozpínanie vosku bez toho, aby došlo k deformácii formy. Pri tomto experimente bol použitý autokláv na vytavenie vosku. Odvoskovanie v autokláve funguje na princípe odstránenia voskového modelu vplyvom pôsobenia pary pri vysokej teplote a tlaku. Vzorové stromčeky boli vytavené pri teplote 140 °C a tlaku 5 barov (0,5 MPa) po dobu 12 minút. Vytavený vosk sa potom regeneruje a používa sa znovu. Vytavené vzorové stromčeky (obr. 64) boli zvažene. Následne boli položené na dopravník, ktorý smeroval do žihacieho tunela.



Obr. 63 Autokláv.



Obr. 64 Vytavené vzorové stromčeky.

6.5 Žihanie a odlievanie

Keramické škrupiny sa zvyčajne žihajú pri zvýšených teplotách, po odvoskovaní, ale pred procesom odlievania. Výsledná keramická forma odoláva vysokým teplotám. Existujú tri dôvody, prečo sa surová forma musí pred odlievaním vypáliť. Prvým dôvodom je odstránenie zbytkového vzorového materiálu, ktorý zostal po procese odvoskovania, druhým je zliatie štruktúry keramiky odstránením absorbovanej vody z kremičitého spojiva a tretím je predohriatie formy pred odlievaním. [38] Suché odvoskované škrupiny sa vložili do pece vyhriatej na 600°C s pomalým zohrievaním na 1050°C. Pri tejto teplote sa žihajú po dobu 1 hodiny. Vzorové stromčeky potom boli vytiahnuté zo žihacej pece (obr. 65) a priemiestnené na liace pole (obr. 66).



Obr. 65 Žihacia pec.



Obr. 66 Vyžihané škrupiny na liacom poli.

Do horúcich vyžíhaných škrupín sa následne naliat roztavený kov (obr. 67). Škrupiny vytvorené podľa varianty A a varianty C boli odliate bez akýchkoľvek problémov. Pri liatí kovu do škrupín varianty B nastali komplikácie. Napriek pridaniu troch zosilňujúcich obalov, pri liatí kovu škrupina varianty B nevydržala tlak kovu, praskla a roztavený kov sa vylial (obr. 68). Takáto reakcia vôbec nebola predvídateľná, pretože vzorky škrupín vytvorené práve touto variantou vykazovali na pevnostných skúškach najväčšie pevnosti za surova aj po vyžíhaní. Reakcia mohla byť spôsobená buď nedostatočnou plasticitou keramickej škrupiny, alebo nadmerným presiaknutím vosku do jednotlivých vrstiev škrupiny, čo spôsobilo jej oslabenie počas žihania.



Obr. 67 Odlievanie.



Obr. 68 Prasknutá škrupina varianty.

6.6 Očisťovanie po odliatí

Po odliatí sa škrupiny preložili do debne a nechali schladnúť (obr. 69). Počas chladnutia kovu opadali niektoré časti keramickej škrupiny, ale značná časť zostala nalepená na odliatkoch. Takto schladnuté stromčeky boli zväžené aj so všetkými opadnutými kúskami škrupiny a hodnoty boli zapísané do tabuľky.

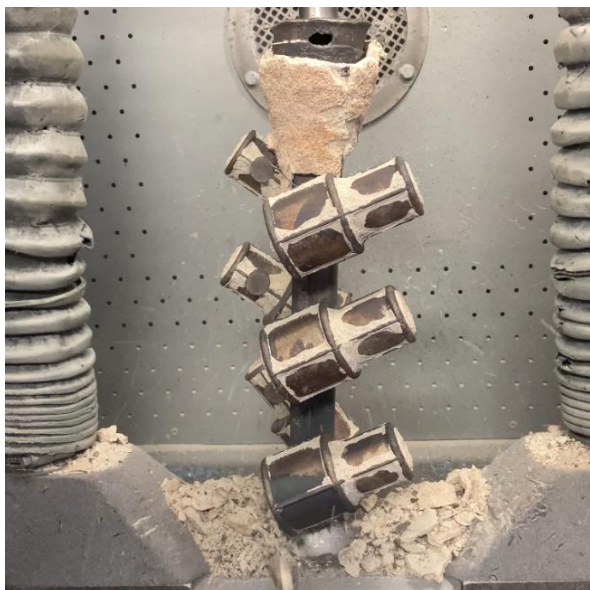


Obr. 69 Vychladnuté vzorové odliatky.

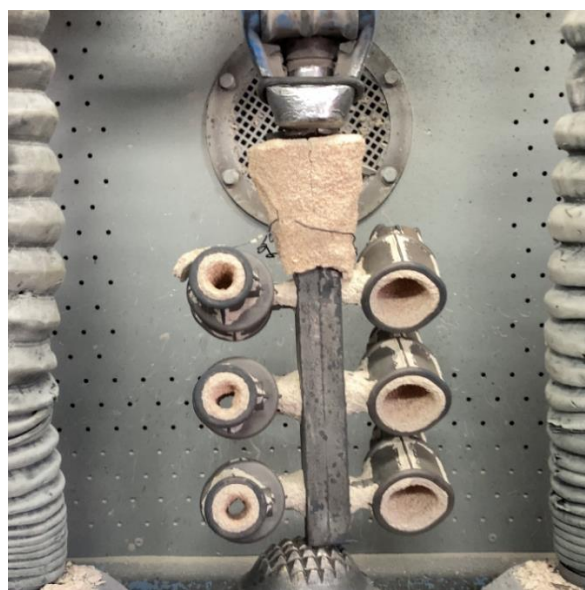
6.6.1 Očisťovanie pomocou pneumatického vibračného zariadenia

Po zväžení sa zo škrupín začal odstraňovať keramickej materiál mechanickými metódami. Prvým krokom dokončovacej operácie bolo odstránenie pomocou pneumatického vibračného zariadenia. Zariadenie vytvára presné vibrácie, ktoré oddeľujú obal žiaruvzdorného materiálu od kovu. Po upnutí do stroja sa spustilo vibrovanie na 5 sekúnd, počas ktorých opadlo najviac

obalu. Vzorové odliatky sa zväžili a namerané hodnoty sa zapísali do tabuľky. Vzhľadom k tomu, že počas bežnej prevádzky vo firme nechávajú tento typ odliatkov v pneumatickom vibračnom zariadení 15 sekúnd, odliatky boli znovu upnuté do tohto zariadenia. Po uplynutí 10-tich sekúnd sa znovu zväžili a výsledné hodnoty zapísali do tabuľky.

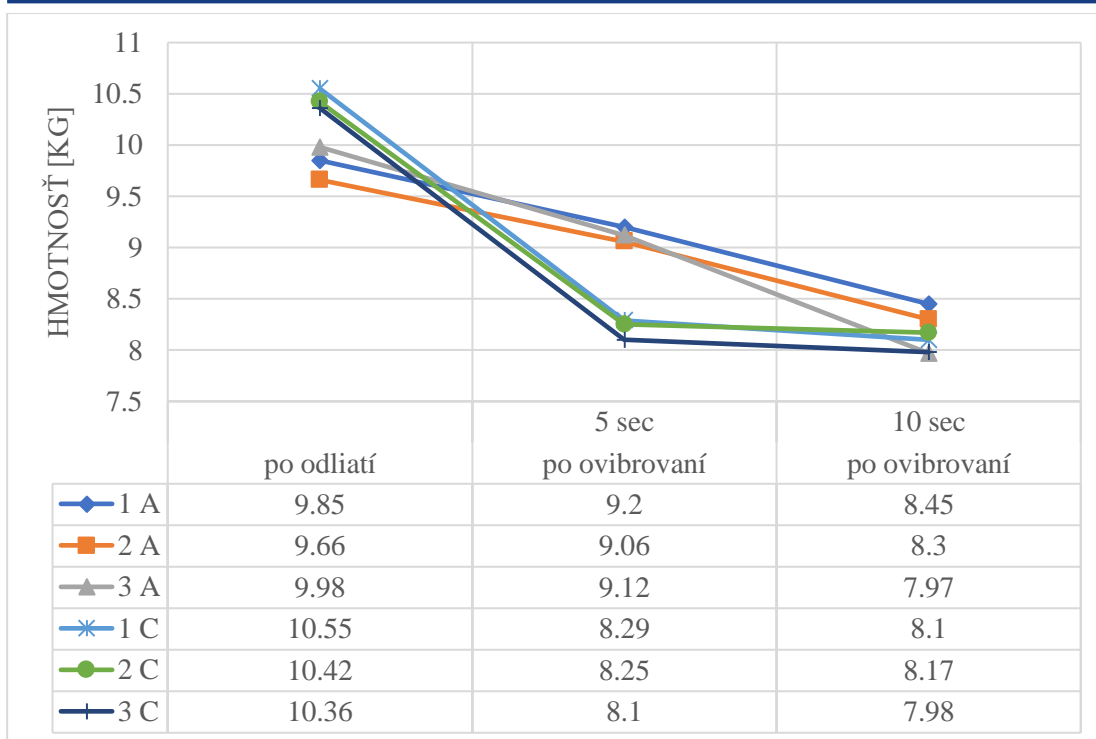


Obr. 70 Škrupina typu A po ovibrovaní.



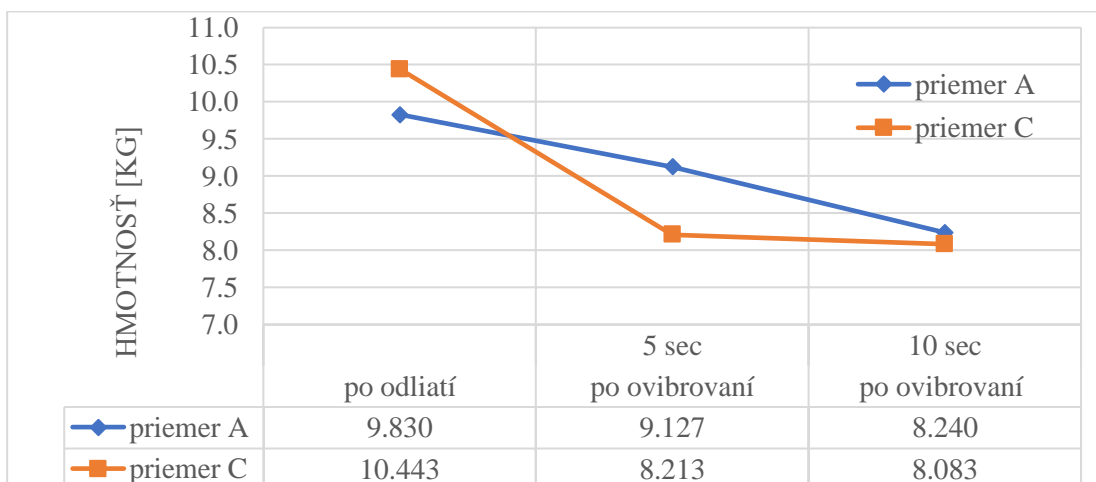
Obr. 71 Škrupina typu C po ovibrovaní.

Po ovibrovaní bolo vizuálne jasné, že na odliatkoch typu A (obr. 70) a odliatkoch typu C (obr. 71) zostalo približne rovnaké množstvo keramickej škrupiny. Po zväžení, zapísaní do tabuľky a vytvorení grafu sa potvrdila predpoveď z vizuálnej kontroly. Z grafu na obr. 72 je viditeľné, že keramická škrupina vytvorená podľa zaužívaných postupov vo firme (A) a keramická škrupina s pridaním vlákien do záložných obalov (C) po prvých piatich sekundách vibrovania vykazovala rozdielne množstvo opadnutej škrupiny. Väčšina škrupiny s pridanými nylonovými vláknami opadla vplyvom vibrácií už po 5 sekundách, zatiaľ čo rovnaké množstvo škrupiny z varianty A opadalo až po 15 sekundách. Po druhom ovibrovaní sa váha oboch typov škrupín zrovnala. Z toho vypíva, že na oboch typoch zostalo rovnaké množstvo zaseknutej škrupiny v kritických miestach odliatkov – v priechodzej diere a v rohoch. Zvyšok keramickej škrupiny by sa neodstránil pomocou pneumatického vibračného kladiva, preto sa dočisťovanie odliatkov dokončilo pomocou tryskacieho závesného zariadenia.



Obr. 72 Graf závislosti hmotnosti rôznych variant škrupín na čase strávenom v pneumatickom vibračnom zariadení.

Pre lepšiu prehľadnosť sa z nameraných hodnôt pre každý typ škrupiny vypočítal aritmetický priemer a hodnoty sa vyniesli do grafu (obr. 73).





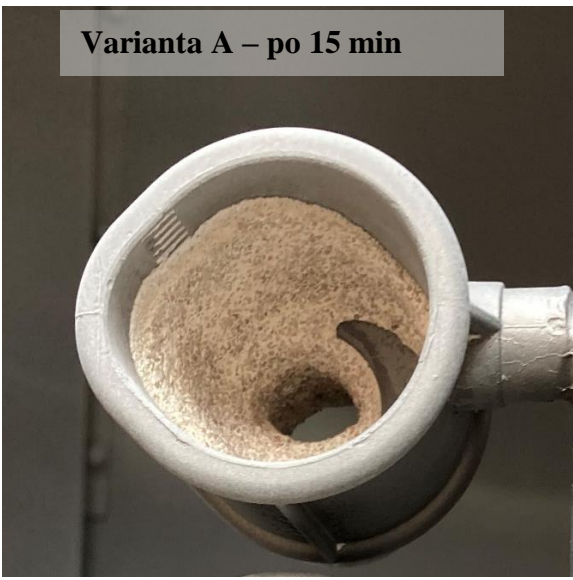

Obr. 73 Graf závislosti hmotnosti aritmetických priemerov jednotlivých typov škrupín na čase strávenom v pneumatickom vibračnom zariadení.

6.6.2 Očisťovanie pomocou tryskacieho závesného zariadenia

Na úplné očistenie odliatkov od keramiky sa teda použilo závesné tryskacie zariadenie. Jednotlivé stromčeky boli zavesené na pohybujúci sa závesný hák a spustilo sa tryskanie guľatými brokami. Vo vnútri tryskacieho zariadenia sa vykonávali rotačné aj priamočiare pohyby, aby broky zasahovali odliatky zo všetkých strán. Po 5 minútach sa stroj vypol a jednotlivé odliatky sa zvažili a hodnoty sa zapísali do tabuľky. Otryskanie tak krátkou dobou nezabezpečilo dostatočné očistenie od keramiky, preto sa opäť vložili do otryskávača, ale tentokrát na 10 minút. Stromčeky boli zavesené/uložené do rovnakej pozície, ako pri prvom

otryskávaní, aby sa obmedzili/ zamedzili vplyvy natočenia. V takýchto 10 minútových intervaloch tryskanie – zváženie sa pokračovalo, kým jednotlivé odliatky neboli dostatočne očistené od keramickej škrupiny. Na nasledujúcej tab. 12. sú vizuálne porovnané stupne opadania škrupiny pre jednotlivé varianty v závislosti na dĺžke očíšťovania v tryskacom závesnom zariadení.

Tab. 12 Porovnanie opadania škrupín na odliatkoch varianty A a varianty C v závislosti na čase otryskávania.

VARIANTA A	VARIANTA C
<p data-bbox="279 571 670 616">Varianta A – po 5 min</p> 	<p data-bbox="901 571 1292 616">Varianta C – po 5 min</p> 
<p data-bbox="279 1220 670 1265">Varianta A – po 15 min</p> 	<p data-bbox="837 1220 1228 1265">Varianta C – po 15 min</p> 

Varianta A – po 25 min



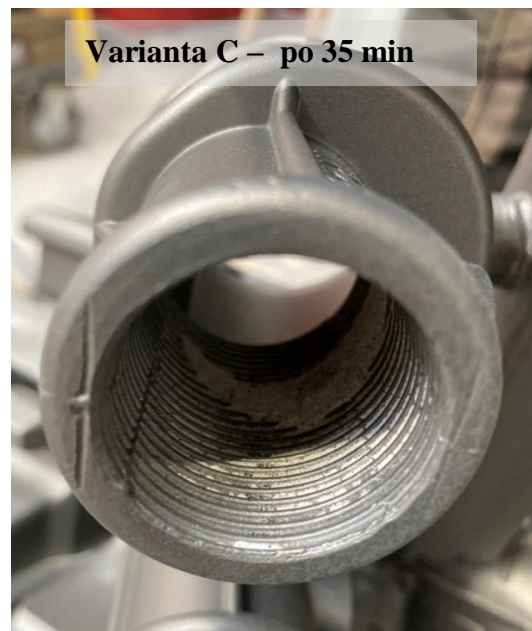
Varianta C – po 25 min



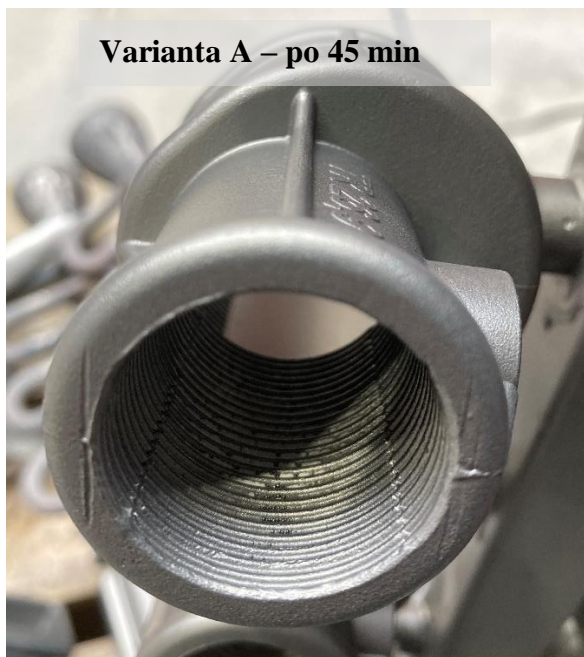
Varianta A – po 35 min



Varianta C – po 35 min



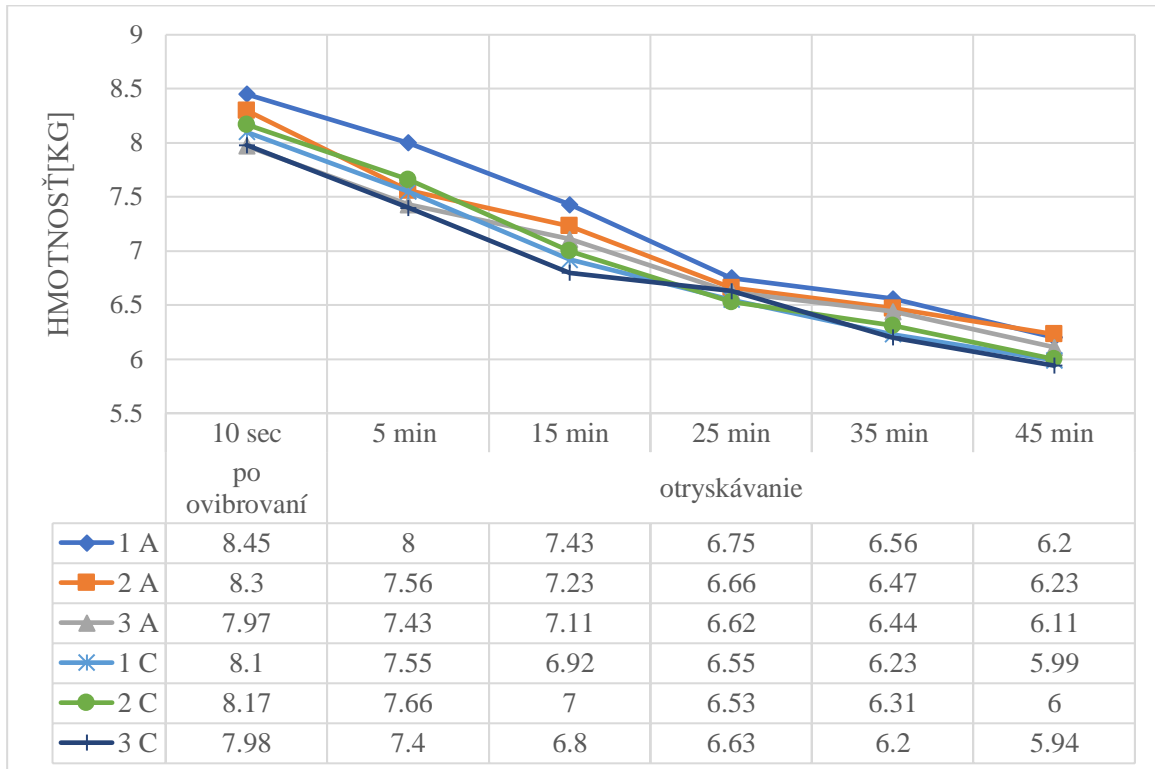
Varianta A – po 45 min



Varianta C – 45 min

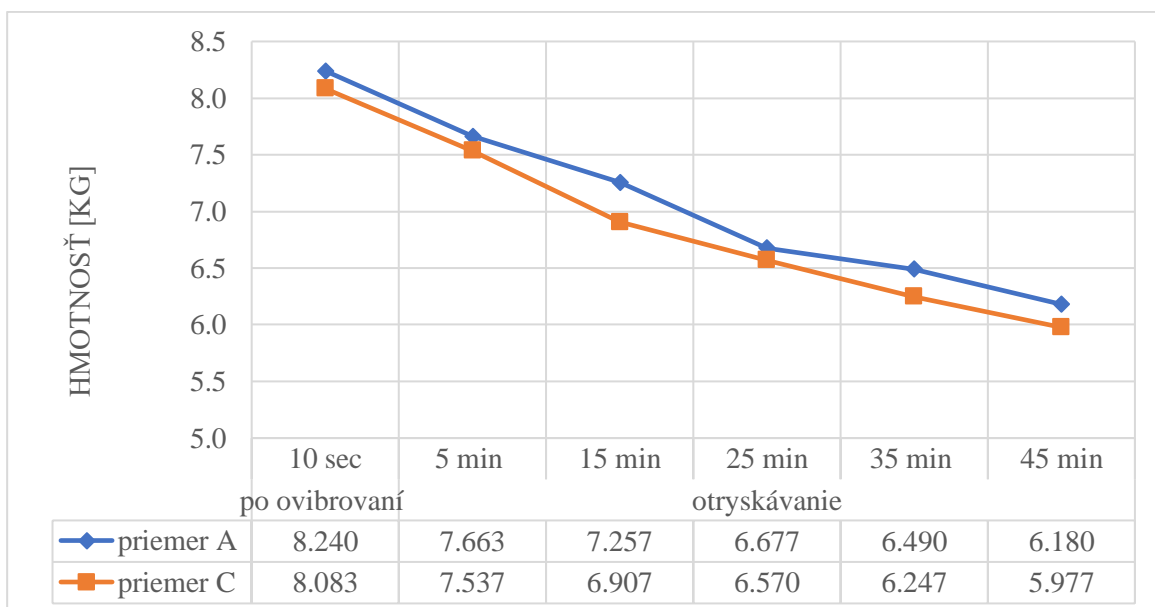


Opäť bolo po vizuálnej kontrole jasné, že zo všetkých vzorových odliatkov sa odstránilo po každom zvažení približne rovnaké množstvo škrupiny, čo nám potvrdili aj následne vynesené hodnoty do grafu na obr. 74.



Obr. 74 Graf závislosti hmotnosti rôznych variant škrupín na čase strávenom v závesnom tryskacom zariadení.

Pre lepšiu prehľadnosť sa z nameraných hodnôt pre každý typ škrupiny vypočítal aritmetický priemer (obr. 75)



Obr. 75 Graf závislosti hmotnosti aritmetických priemerov jednotlivých typov škrupín na čase strávenom v závesnom tryskacom zariadení.

ZÁVER

Diplomová práca je zameraná na optimalizáciu výroby škrupinových foriem vyrobených technológiou vytaviteľného modelu na zlepšenie ich rozpadavosti po odliatí vo firme MoraviaTech a.s. V prvej časti diplomovej práce je rozobraná problematika rozpadavosti škrupinových foriem. V tejto časti sú teoreticky opísané spôsoby odstraňovania keramickej škrupiny, možné vplyvy na rozpadavosť, ako je vhodná voľba materiálu, metodika nanášania posypu, doba namáčania jednotlivých obalov a ich sušenie. Všetky tieto faktory by mohli ovplyvniť rýchlosť odstraňovania keramických škrupín po odliatí. V literárnej rešerši sú tiež spomenuté možnosti skúšania keramických suspenzií a keramických škrupín. V poslednej časti literárnej rešerše sú spomenuté možnosti modifikácie pridanými látkami, ktoré by tiež mohli mať pozitívny vplyv na rozpadavosť.

Na začiatku bol zvolený vzorový model, s ktorým majú vo firme MoraviaTech a.s. problémy pri odstraňovaní keramických škrupín po odliatí. Cieľom experimentálnej časti bolo zvoliť vhodnejšie zloženie obal'ovacieho systému, ktorý nahradí súčasne používaný. V prvej časti sú popísané jednotlivé zloženia navrhovaných variant. Porovnanie týchto variant tvorby škrupiny prebehlo na základe rôznych skúšok keramických suspenzií a pevnostných skúšok.

Experimentálna časť sa zaoberá metodikou testovania rozpadavosti. Najskôr boli prevedené pevnostné skúšky každej vytvorenej varianty za účelom zistenia, ako sa budú jednotlivé škrupiny správať počas odvoskovania, odlievania a odstraňovania zvyškov keramiky po odliatí. Vďaka týmto skúškam sa zistilo, že modifikácia nylonovými vláknami by mohla mať vplyv na konečnú rozpadavosť foriem, pretože na týchto vzorkách boli namerané najmenšie zvyškové pevnosti. V druhej časti experimentu bola navrhnutá metodika testovania rozpadavosti v praxi, ktorá je vytvorená so zámerom potvrdiť alebo vyvrátiť závery z výsledkov pevnostných skúšok jednotlivých variant. Prevedením praktických skúšok sa nepotvrdili závery z pevnostných skúšok vzoriek. Zo štatistického hľadiska sa nedá určiť, či bude mať modifikácia nylonovými vláknami vplyv na rozpadavosť, pretože bol nedostatočný počet meraných vzoriek. Pre objektívne štatistické hodnotenie by bolo nutné previesť väčšie množstvo opakovaných meraní. Vzhľadom k časovej náročnosti testov, nebolo možné tieto testy v diplomovej práci previesť. Rozdielne výsledky medzi testovaním vzoriek a praktickým overením mohlo byť ovplyvnené tvarovým faktorom vzorového odliatku. Modifikácia nylonovými vláknami by mohla mať zlepšený účinok rozpadavosti na jednoduchších tvaroch odliatku.

Na základe prevedenia experimentu takto modifikovaná keramická škrupina výrazne nezlepšuje rozpadavosť u tvarovo zložitejších modelov, kde sa vyskytujú uzavreté priestory a dutiny. Zvažovanie zmeny doterajších postupov sa firme MoraviaTech a.s. z niekoľkých predstavených dôvodov neoplatí. Hlavným dôvodom je zvýšenie ceny nákladov na vytvorenie škrupiny. Ďalším problémom navrhovaného postupu je časová náročnosť. Zatiaľ čo vo firme na výrobu dostatočne pevnej škrupiny pre tento typ odliatku aplikujú iba 6 obalov, v experimentálnom postupe bolo vytvorených 8, čo znamená predĺženie času na výrobu škrupiny o jeden deň. Týmto experimentom sa zistilo, že vo firme MoraviaTech a.s. majú vhodne zvolený postup výroby obalov jednotlivých odliatkov. Za vhodný sa považuje vzhľadom k počtu obalov, vlastnostiam dostačujúcim pre odlievanie v danej zlievarni a následnej rozpadavosti.

Varianta B vyrobená podľa odporúčania od výrobcu so sníženým obsahom pevných látok v spojive a sníženým obsahom žiaruvzdorných látok nebola vyhodnotená z dôvodu praskania vo fáze vytavovania a odlievania. Pre ďalšie výskumy by bolo možné upraviť hustoty zosilovacích suspenzií, a tým zvýšiť nabal'ovacu schopnosť. Po tejto úprave by sa mohli previesť skúšky rozpadavosti a zhodnotiť ich aj pre túto variantu.

Vzhľadom na výrazný vplyv tvarového faktoru odliatku, by mohol byť v nasledujúcej práci preskúmaný vplyv natočenia jednotlivých odliatkov v tryskacom závesnom zariadení. Pozícia zavesenia jednotlivých odliatkov by mohla určitým spôsobom zlepšiť efektivitu odstraňovania keramických škrupín po odliatí a takto zvýšiť efektivitu tryskania.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

1. JONES, S a C YUAN. Advances in shell moulding for investment casting. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2003, **2003**(135), 258-265 [cit. 2022-03-31]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00907-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00907-X)
2. KLINE, Darryl M. Controlling strength and permeability of *silica investment casting molds*. 2010. Masters Theses.
3. SAROJRANI, Pattnaik, D. KARUNAKAR a P.K. JHA. Developments in investment casting process—A review. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2012, **212**(11), 2332-2348 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>
4. KLEINE, D.M., S.N. LEKAKH a V.L. RICHARDS. Improving investment casting mold permeability using graphite particles. *American Foundry Society* [online]. 2010, (118), 1-7 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://web.mst.edu/~lekakhs/webpage%20Lekakh/Articles/10-087.pdf>
5. KUMAR, Sanjay a D. KARUNAKA. Enhancing the *Permeability* and Properties of Ceramic Shell in Investment Casting Process Using ABS Powder and Needle Coke. *International Journal of Metalcasting* [online]. 2019, 3(13), 588-596 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40962-018-00297-7>
6. RICHARDS, Von. INVESTMENT CASTING SHELL CRACKING. *Columbia, 2003*. Masters Theses. University of Missouri.
7. WEISSENBACHER, M., C. LIND a J. WOLFF. Refractory Materials Used for the Investment Casting Process and their Influence on Ceramic Shell Properties. *Technology trends* [online]. 2011, (4), 67-72 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: https://www.refractories-worldforum.com/php/news/news_rwf_download.php?article_id=11042
8. PRASAD, Ram. Progress in Investment *Castings*. Science and Technology of Casting Processes [online]. InTech, 2012 [cit. 2022-03-23]. ISBN 978-953-51-0774-3. Dostupné z: doi:10.5772/50550
9. BEELEY, Peter a Robert SMART. Investment Casting. London: Institute of Materials, 1995. ISBN 0 901716 66 9.
10. PNEUMATIC SHELL KNOCKOUT MACHINE. In: *Laxminarayan technologies* [online]. 2019 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <http://www.ic-machines.com/pneumatic-shell-knockout-machine/>
11. Robotic Waterjet Investment Casting Shell Removal. In: *Progressive Surface* [online]. USA, c2016-2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.progressivesurface.com/waterjetcleaning/robotic-waterjet-investment-casting-shell-removal.htm>
12. Ceramic Shell & Core Removal. In: *Aquarese shape technologies group* [online]. France, 2019 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://aquaresewaterjet.com/waterjet-processes/ceramic-shell-core-removal/>
13. Steel Shot. In: *Bosun abrasive* [online]. Sanghai, China, 2010-2017 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.chinabosun.com/steel-shot-s550.html>
14. Steel Cut Wire Shot. In: *Bosun abrasive* [online]. Sanghai, China, 2010-2017 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.chinabosun.com/steel-cut-wire-shot-1mm.html>
15. HAMILTON, Chris. How Is Steel Shot Manufactured?. In: *Biz fluent* [online]. 2017 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://bizfluent.com/about-6699639-steel-shot-manufactured-.html>

16. Závěsná tryskací zařízení OPTIMA. In: Tryskací zařízení, metací kola, filtrace prachu [online]. Bučovice, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.oteco.cz/cz/produkty/metaci-kola/optima/>
17. Bubnová tryskací zařízení OPTIMA. In: Tryskací zařízení, metací kola, filtrace prachu [online]. Bučovice, 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.oteco.cz/cz/produkty/metaci-kola/smart/>
18. HERMAN, Aleš. Lití na vytavitelný model [online]. 1-30 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://adoc.pub/ing-ale-herman-phd.html>
19. JOSEF, DOŠKÁŘ. *Přesné lití do keramických forem*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961.
20. LUCAS, Jozeph G. *Removal of ceramic investment shell mold from metal casting*. 1975. Uděleno 24.5.1977. Zapsáno 4.9.1975.
21. 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]. 2008, **2008**(17), 489-498 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-007-9162-8
22. BUNDY, J. a S. VISWANATHAN. *Characterization of Zircon-Based Slurries for Investment Casting*. *International Journal of Metalcasting* [online]. 2009, 3, 27-37 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/BF03355439>
23. CAMACHO, Alini, Regina MODOLO, Victor FERREIRA, Fernando ROCHA a Carlos MORAES. INVESTIGATION OF THE RAW MATERIALS FROM THE PRECISION CASTING PROCESS FOR VIABILITY EVALUATION OF RECYCLING THE GENERATED CERAMIC SHELL WASTE. *MIX Sustentável* [online]. 2021, 8(1), 53-65 [cit. 2022-05-08]. ISSN 24473073. Dostupné z: doi:10.29183/2447-3073.MIX2021.v8.n1.1
24. JONES, Samantha. *IMPROVED SOL BASED CERAMIC MOULDS FOR USE IN INVESTMENT CASTING*. *United Kingdom, 1993*. Doctoral. University of Birmingham.
25. Raw materials. In: Form servis [online]. 2022 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <http://www.formservis.cz/en/o-firme/products/raw-materials/>
26. SOUKUPOVÁ, Lucie. *Optimalizace technologie výroby odlitku ze slitin Al metodou vytavitelného modelu*. Brno, 2013. Diplomová práce. *Vysoké učení technické v Brně*.
27. Zircon. In: *Ransom & Randolph* [online]. 2019 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.ransom-randolph.com/zircon>
28. RUSÍN, Karel. *Slévárenské formovací materiály: celostátní vysokoškolská učebnice pro skupinu studijních oborů strojírenství a ostatní kovodělná výroba*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1991.
29. JELÍNEK, Petr. *Disperzní soustavy slévárenských formovacích směsí: ostřiva*. Ostrava, 2000. ISBN 80-238-6118-2.
30. PETRŽELA, Lev. *Slévárenské formovací látky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.
31. JONES, S., C. YUAN a S. BLACKBURN. *Fundamental study on microstructure and physical properties of fluidised bed and rainfall sanding ceramic shells*. *Materials Science and Technology* [online]. 2007, **6**(23), 706-714 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: doi:10.1179/174328407X185811
32. DOOLEY PHD, Gavin. *Stucco Application Methods – The Theory*. In: *Remet* [online]. 2022 [cit. 2022-05-02]. Dostupné z: <https://www.remet.com/en/insights/stucco-application-methods-the-theory/>

33. ZAWATI, Harun. Simulation of drying for multilayer investment casting shells. [online]. United Kingdom, 2007 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://cronfa.swan.ac.uk/Record/cronfa42815>. Doctoral. Swansea University. Vedoucí práce Prof. David Gethin.
34. BRIENZA, Michael, Danielle KAYE, Andrew BOROWSKY, Nicolas DOIRON a Mark OLES. Intercoat Drying and Shell Properties [online]. Milford,: *New Hampshire: Hitchiner Manufacturing Co. Inc.* [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.investmentcasting.org/uploads/8/1/9/8/81988734/6_hitchiner_case_study.pdf
35. GUERRA, Manuel. Drying of Ceramic Shells – The Theory. In: *Remet* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.remet.com/en/insights/drying-of-ceramic-shells-the-theory/>
36. SCHERER, George W. Theory of Drying. *Journal of the American Ceramic Society* [online]. 1990, 73(1), 3-14 [cit. 2022-05-16]. ISSN 0002-7820. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb05082.x>
37. GUERRA, Manuel. Drying of Ceramic Shells – The Practice. In: *Remet* [online]. 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.remet.com/en/insights/drying-of-ceramic-shells-the-practice/>
38. XU, Mingzhi a Jingjing QING. Effect of Firing Temperature and Duration on Fused Silica Investment Shell Strength at Room Temperature. *International Journal of Metalcasting* [online]. 2019, 13(4), 923-927 [cit. 2022-04-09]. ISSN 1939-5981. Dostupné z: doi:[10.1007/s40962-019-00312-5](https://doi.org/10.1007/s40962-019-00312-5)
39. Monitoring and controlling viscosity of ceramic slurries in investment casting. In: *Rheonics* [online]. Switzerland, 2021 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://rheonics.com/solutions-item/monitoring-and-controlling-viscosity-of-ceramic-slurries-in-investment-casting/>
40. SOUKUPOVÁ, Lucie, Milan HORÁČEK a Thomas KRUMREI. OPTIMIZED CERAMIC SHELL FOR MANUFACTURING OF ALUMINIUM CASTINGS USING LOST WAX TECHNOLOGY. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara* [online]. 2015, 2(13), 79-82 [cit. 2022-05-08]. ISSN 1584-2673. Dostupné z: <https://www.proquest.com/docview/1681112076/fulltextPDF/A13412BDAE4F44F9PQ/1?accountid=17115>
41. BRITANIA, Encyclopedia. "viscosity". In: *Britannica, The Editors of Encyclopaedia* [online]. 2022 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/viscosity>
42. HENDRICKS, Mike a Mark BIJVOET. Ceramic Shell Preparation and Control: Presentation. In: BIJVOET, Mark. *Recent Trends In Investment Casting: International Seminar*. Cairo: Central metallurgical research and development institute, 2007, s. 1-47.
43. Flexural Strength | It's Complete Overview and 10 FAQs. In: *LambdaGeeks* [online]. Pratidhwani, 2022 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: <https://lambdageeks.com/flexural-strength/#Three-Point%20Bend%20test%20and%20Equations>
44. NANDA, Prima. The Effect of Stucco Sand Size on the Shell Mould Permeability and Modulus of Rupture (MOR). *Journal of Aeronautical* [online]. 2018, (13) [cit. 2022-05-17]. ISSN 2442-6407.
45. RAHEEM, Zainab. Designation: D 7264/D 7264M -07 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix *Composite Materials 1* [online]. 2020 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/339947727_Designation_D_7264D_7264M_-

07_Standard_Test_Method_for_Flexural_Properties_of_Polymer_Matrix_Composite_Materials_1

46. MORRELL, R., P.N. QUESETED, S. JONES a D.A. FORD. DISIC - Dimensional stability of ceramic casting moulds. *National Physical Laboratory* [online]. 2006, 1-80 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://eprintspublications.npl.co.uk/3440/>
47. Flexural strength tests of ceramics. In: *SubsTech Substances and Technologies* [online]. 2012 [cit. 2022-04-27]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=flexural_strength_tests_of_ceramics
48. EVERHART, W., S. LEKAKH, V. RICHARDS, J. CHEN, H. LI a K. CHANDRASHEKHARA. Corner Strength of Investment Casting Shells. *International Journal of Metalcasting* [online]. 2013, 2013(7), 21-27 [cit. 2022-04-04]. ISSN 2163-3193. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1007/BF03355541>
49. YUAN, C., S. JONES a S. BLACKBURN. The influence of autoclave steam on polymer and organic fibre modified ceramic shells. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2005, (25), 1081-1087 [cit. 2022-04-04]. ISSN 0955-2219. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.04.011>
50. HUANG, Pengpeng, Dr. GANG, Yan QINGSONG a Mao PU. Effect of Ceramic and Nylon Fiber Content on Composite Silica Sol Slurry Properties and *Bending Strength* of Investment Casting Shell. *Materials* [online]. 2019, 2019(2788), 1-12 [cit. 2022-03-31]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390
51. SANTHOSH, Kumar a Hiremath SOMASHEKHAR. Natural Fiber Reinforced Composites in the Context of Biodegradability. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* [online]. 2020, 2020(5), 160-178 [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11418-3>
52. BUNSELL, A.R. High-performance Fibers. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)* [online]. Oxford, 2005, 1-10 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/02100-8>
53. SAROJRANI, Pattnaik. Influence of sawdust on the properties of the ceramic shell used in investment casting process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2017, (93), 1-17 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-017-0559-8
54. KAI, Lu, Liu XIANG-DONG, Du ZHAO-XIN a Li YAN-FEN. Bending strength and fracture surface topography of natural fiber-reinforced shell for investment casting process. *China Foundry* [online]. 2016, 2016(13), 211-216 [cit. 2022-04-07]. ISSN 2365-9459. Dostupné z: doi:10.1007/s41230-016-5100-4
55. KAILA, Vishal N. An Effect of Ceramic Materials in Shell Mould Used in an Investment Casting Process. *Indian foundry journal* [online]. 2019, 2(65), 57-61 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/358139039_An_Effect_of_Ceramic_Materials_in_Shell_Mould_Used_in_an_Investment_Casting_Process
56. BATLLÓ, Francois, David VIERS a Jeffrey MOSHER. Method of improving the removal of investment casting shells. 2004. USA. Uděleno 2006. Zapsáno 2004.
57. HORÁČEK, Milan. Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu. Brno: Odbor slévárenství ÚST, FSI VUT Brno [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/studium/studijni-opory>

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

Zkratky

Označení	Legenda
AFL	Adjusted fracture load
CBT	Keramický odpad keramických obkladov a pálených tehiel
CSW	Keramický odpad zo sanitárnych produktov – vane , umývadlá...
CTW	Keramický odpad z fabriek na výrobu obkladačiek
MOR	Modulus of rapture