



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV POUŽITÝCH SUROVIN NA KONEČNOU KVALITU AL ODLITKŮ ZHOTOVENÝCH TECHNOLOGIÍ VYTAVITELNÉHO MODELU

INFLUENCE OF RAW MATERIALS TO THE FINAL QUALITY OF ALUMINIUM INVESTMENT
CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Macko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Milan Horáček, CSc.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: Bc. Martin Macko
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
Akademický rok: 2017/18

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

Vliv použitých surovin na konečnou kvalitu Al odlitků zhotovených technologií vytavitelného modelu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zjištění vlivu použitých surovin na dosažení bezvadného odlitku (tj. požadovaných rozměrů a povrchové a vnitřní jakosti) zhotoveného technologií vytavitelného modelu. Prioritní zaměření na optimalizaci keramické skořepiny z hlediska dosažení optimálních hodnot její pevnosti a současně prodyšnosti.

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je porovnání současně používané technologie (především materiálů skořepin) s technologií nově navrženou.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, P.R., R.F. SMART. Investment Casting, 1st ed. Cambridge: The University Press, 1995. 488 p. ISBN 09-017-1666-9.

CAMPBELL, J. Castings. 1st ed. Oxford: Butterworth – Heinemann, 1991. 288 p. ISBN 0-7506-1072.

HORÁČEK, M. Technologie vytavitelného modelu - technologie pro nové tisíceletí. Slévárenství, 2001, č. 10, s. 570 –580. ISSN 0037-8825.

HORÁČEK, M. Tradition, Present State and Perspectives of Foundry Industry, Proceedings of the World Technical Forum, Brno 1st – 3rd June, 2009.

HORÁČEK, M. Accuracy of castings manufactured by the lost wax process, Foundry Trade Journal 3535, October, 1997, p. 424-429.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Cílem práce je zhodnotit stávající technologii výroby keramické skořepiny ve slévárně MESIT Foundry, a.s. a technologii optimalizovat. Skořepiny jsou zhodnoceny z hlediska pevnosti, prodyšnosti a mikrostruktury. Následně jsou vyhodnoceny i vyrobené odlitky z hlediska množství neshodných výrobků a výskytu vad. Na konec jsou porovnány výsledky jednotlivých skořepin a naznačen další možný směr vývoje skořepiny.

Klíčová slova

Přesné lití, vytavitelný model, keramická skořepina, keramická břecha

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to assess the current state of production of ceramic shells in MESIT Foundry, a.s. and optimize it. The shells are evaluated in terms of their bending strength, gas permeability and microstructure. Subsequently, castings produced using the shells are evaluated with regard to number of non-conforming products and presence of defects. The final part seeks to compare different shells and outlines a possible new approach to the development of ceramic shells.

Key words

Investment casting, lost wax technology, ceramic shell, ceramic slurry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACKO, Martin. *Vliv použitých materiálů na konečnou kvalitu Al odlitků zhotovených technologií vytavitelného modelu*. Brno 2018. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 70 s. Vedoucí práce prof. Ing. Milan Horáček CSc

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Vliv použitých surovin na konečnou kvalitu AI odlitků zhotovených technologií vytavitelého modelu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Martin Macko

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto prof. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc. za poskytnuté materiály, připomínky a rady při zpracování diplomové práce a Ing. Jiřímu Horenskému z MESIT Foundry, a. s. za realizaci její experimentální části.

OBSAH

REŠERŠE LITERATURY	10
1 POPIS TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU	10
1.1 Výroba matečné formy a voskového modelu	11
1.1.1 Vosky	11
1.2 Výroba skořepiny	13
1.3 Vytavování skořepiny	13
1.4 Vyžihání skořepiny	14
1.5 Odlévání	14
2 KERAMICKÁ SKOŘEPINA	15
2.1 Struktura a vlastnosti keramické břečky	15
2.1.1 Pojiva keramických břeček	15
2.1.2 Výroba koloidních křemičitých solí	16
2.1.3 Aditiva s obsahem vláken	17
2.1.4 Surfaktanty	18
2.1.5 Aditiva zabraňující pění (antifoam)	19
2.1.6 Plniva keramických břeček	19
2.2 Příprava a udržování keramické břečky	22
2.2.1 Reologické vlastnosti a stabilizace břečky	22
2.2.2 Parametry ovlivňující viskozitu	23
2.2.3 Kontrola a měření vlastností břečky	24
2.3 Posyp a výroba keramické skořepiny	26
2.3.1 Tepelné vlastnosti skořepin	27
2.4 Kontrola a měření vlastností skořepiny	28
2.4.1 MOR (Pevnost v ohybu)	28
2.4.2 Zkouška prodyšnosti	29
2.4.3 Dilatometrie	29
2.4.4 Laser flash analysis – zkouška tepelné vodivosti	29
2.4.5 SEM analýza výbrusů skořepin	30
2.5 Vady keramické skořepiny	30
2.6 Vady odlitku související s kvalitou skořepiny	31
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
3 ETAPA 1	34
3.1 Výroba skořepiny	34
3.2 Původní složení skořepiny	35

3.2.1	Měření pevnosti MOR	37
3.2.2	SEM analýza	39
3.2.3	Měření prodyšnosti.....	41
3.3	Původní složení skořepiny – ruční obalování pomocí břečky z robota.....	43
3.3.1	Měření pevnosti MOR	44
3.3.2	Měření prodyšnosti.....	45
3.4	Vady odlitků a zmetkovitost.....	46
4	ETAPA 2	51
4.1	Modifikace plniva na Molochite 120	51
4.1.1	Měření pevnosti MOR	52
4.1.2	SEM analýza	53
4.1.3	Měření prodyšnosti.....	55
4.1.4	Vady odlitků a zmetkovitost.....	56
5	DISKUZE	58
5.1	Robotické obalování.....	58
5.2	Ruční obalování – Ransom & Randolph a Granisol (ETAPA 1).....	59
5.3	Modifikace plniva na Molochite 120 (ETAPA 2)	60
5.4	Návrhy pro další vývoj skořepiny	61
5.4.1	Otázka souvislosti typu sušení a podílu odlitků se zadrobeninami.....	62
	ZÁVĚR	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	64
	SEZNAM OBRÁZKŮ	67
	SEZNAM TABULEK.....	69
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	70

ÚVOD

Odléváním metodou vytavitelného modelu je možné zhotovit tvarově složité odlitky s malými rozměrovými tolerancemi a vysoko kvalitou povrchu. Odlitky touto technologií jsou vyráběny „téměř na hotovo“ (near-net shape) bez nutnosti dalších dokončovacích operací. Od svého vzniku se metoda stala z vysoce specializované běžně používanou. O tom vypovídá i to, že české Sdružení přesného lití (Czech Investment Casting Association) v současnosti sdružuje 36 členů z ČR i Slovenska. Odlitky zhotovené metodou vytavitelného modelu jsou úspěšně používány ve strojírenství, leteckém a zbrojním průmyslu, lékařství nebo energetice [1, 2].

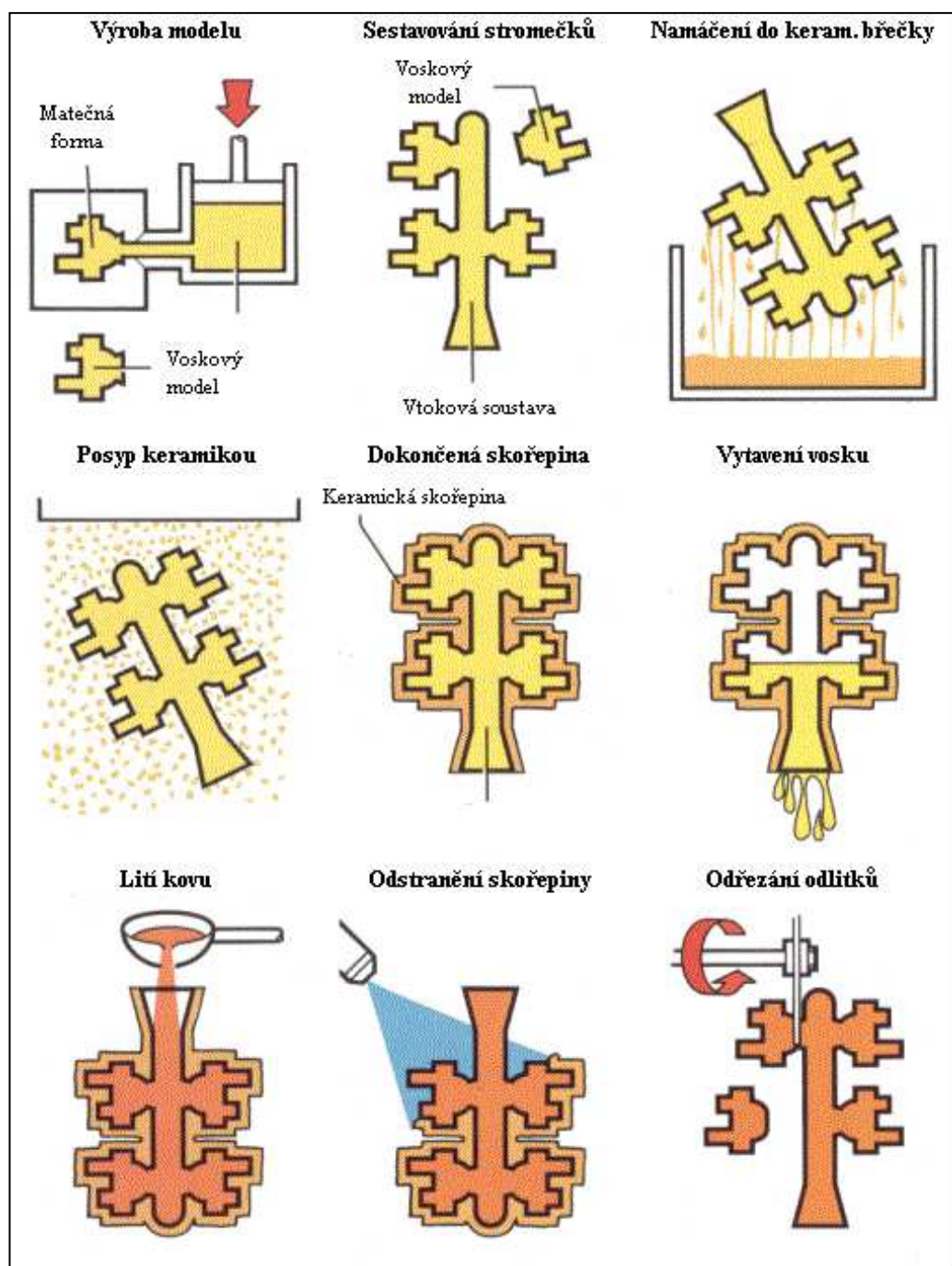
Cílem práce je zhodnotit stávající technologii výroby keramických skořepin v podmínkách slévárny MESIT Foundry, a.s. v Uherském Hradišti a následně ji optimalizovat pro dosažení vyšší kvality odlitků. To bude provedeno měřením pevnosti, prodyšnosti a analýzou mikrostruktury a následně pokusem o nalezení vztahu mezi těmito veličinami a vznikem (množstvím) povrchových vad souvisejících s kvalitou keramické skořepiny. Experimentální část práce (zkoušky MOR, pevnost, a analýza SEM) byla provedena v ITCA, vývojovém a výzkumném centru společnosti IMERYS ve Villachu.

V úvodní části práce je stručně shrnuta technologie vytavitelného modelu. V kapitole 2 je detailně popsán proces výroby keramické skořepiny včetně měření vlastností a vad odlitků souvisejících s kvalitou skořepiny. V experimentální části jsou vyloženy výsledky měření, provedených v ITCA. Na konec jsou srovnány vyrobené skořepiny z hlediska výsledků měření a zmetkovitosti, a také je navržen další směr při vývoji nové skořepiny.

REŠERŠE LITERATURY

1 POPIS TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

Proces je možné rozdělit na 9 základních kroků:



Obr. 1 – Princip technologie [3]

1.1 Výroba matečné formy a voskového modelu

K výrobě modelu je nejprve třeba zhotovit matečnou formu. Výrobní proces se nejčastěji uskutečňuje pomocí obrábění, a to buď ze slitin hliníku nebo z oceli. Výhody hliníkových forem jsou zejména menší hmotnost, cena a nepatrně větší rychlost produkce v důsledku větší tepelné vodivosti hliníku. Ocelové formy se naopak vyznačují větší odolností vůči otěru či snadnějšími opravami. Samotná produkce probíhá nejčastěji pomocí konvenčních způsobů obrábění jako např. frézováním nebo soustružením. Kvůli své vysoké ceně jsou takto zhotovené formy vhodné zejména pro velkosériovou výrobu [4].

Mezi další možné metody se řadí výroba metalizováním, kdy se na matečný model (ze dřeva, epoxydové pryskyřice, vosku, vulkanizované gumy) nanese vrstva kovu. Nejčastěji je používán zinek, zřídka také hliník, ocel nebo mosaz. Životnost takto zhotovené formy může být až 100 000 vstříknutí vosku [4, 5].

Výroba forem je dále možná pomocí nízkotavitelných slitin (Sn, Bi, Pb, Cd) a galvanoplastikou.

Samotná výroba modelu probíhá vstříknutím vosku do matečné formy při teplotě 55-90°C. Po vstříknutí je model vytažen z formy a připraven k sestavení do stromečku [4, 5].

1.1.1 Vosky

Většina vosků používaných ve slévárenství jsou komplexní sloučeniny s mnoha složkami, jakými jsou např.:

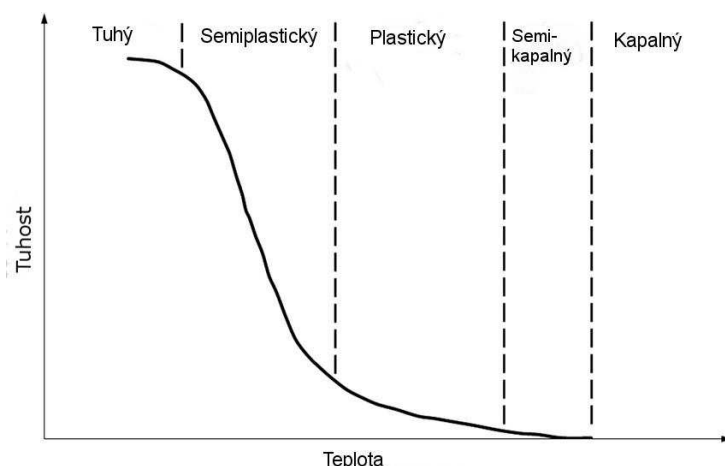
- vosky na bázi uhlovodíků
- vosky na bázi přírodních esterů
- syntetické vosky
- přírodní pryskyřice
- syntetické pryskyřice
- organická plniva
- voda [6]

Struktura vosků na bázi uhlovodíků, přírodních esterů i mnoha syntetických vosků je založena na sloučeninách uhlíku složených do přímých řetězců. Délka těchto řetězců ovlivňuje plastické vlastnosti a tavicí teplotu vosku. Platí, že se zvětšující se délkou řetězce se tvrdost i tavicí teplota zvyšuje a naopak [4, 6].

Při zahřívání vosk prochází několika stavy:

Tuhý → plastický → semiplastický → semikapalný → kapalný

Tato změna se děje v důsledku rozdílné délky řetězců. Při ochlazování proces probíhá analogicky od zkapalnění až k úplnému ztuhnutí.



Obr. 2 – Závislost tvrdosti vosku na teplotě [4]

Tak jako i u jiných materiálů vosk se vzrůstající teplotou zvětšuje svůj objem. Ve srovnání s kovy je tento vzrůst poměrně značný, zejména po dosažení teploty tavení, kdy probíhá změna do kapalného skupenství [7].

Vosky můžeme rozdělit do následujících kategorií:

- A) Přímé (neplněné) vosky – lesklý povrch, vhodné pro regeneraci a rekonstituci k opětovnému použití pro modely i vtoky.
- B) Emulsifikované vosky – obsahují emulsifikační činidlo (obvykle 7-12 % vody), výhodou je malá přilnavost k matečné formě.
- C) Plněné vosky – plniva jsou v podobě prášku, nerozpustná ve vosku. K úplnému vypálení je třeba, aby plnivo tvořily jemné částice.
- D) Vtokové vosky – nižší bod tuhnutí a viskozita pro snadnější vytavení.
- E) Vodou rozpustné vosky
- F) Speciální vosky – např, vodou rozpustné vosky pro výrobu jader [7, 8].

Jako plniva vosků se standardně používají:

- A) Zesítný metakrylát (XLMA)
- B) Zesítný polystyren (XLPS) – teplotně stabilní plnivo, vosky s XLPS mohou být snadno regenerovány.
- C) Lineární polystyren – nižší bod tuhnutí než XLPS.
- D) Bisfenol A – vosky s tímto plnivem mohou být vstřikovány při nízkých teplotách (Bisfenol A tuhne při teplotách nad 100 °C).
- E) Voda – vosky plněné vodou disponují hladkým povrchem. Voda je však náchylná k vypařování, proto je nutné kontrolovat teplotu vosku.
- F) Kyselá plniva – nejčastěji kyselina tereftalová a kyselina isoftalová [9, 10].

Plnivo by mělo mít podobnou teplotu tavení jako vosk, aby při roztavení nedocházelo k segregaci [4].

Mezi důležité parametry, které se snažíme řídit správným složením vosku, patří:

- bod tuhnutí nebo skápnutí
- obsah popela
- pevnost a pružnost
- viskozita
- kvalita povrchu
- odolnost vůči oxidaci
- regenerovatelnost
- doba tuhnutí [4]

Klíčovým parametrem kvality vosků je obsah popela, který by podle doporučení BICTA (British Investment Casting Trade Association, v současnosti včleněno do The Cast Metals Federation) neměl překročit 0,05 % [4].

1.2 Výroba skořepiny

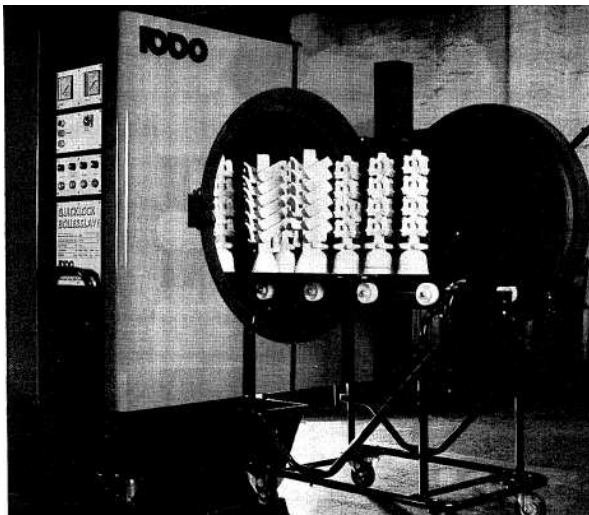
Sestavené modely jsou následně namáčeny v keramické břečce (buď ručně nebo pomocí robota). Po okapání přebytečné břečky jsou modely posypány ostřivem a usušeny. Tento proces se opakuje do vytvoření požadovaného počtu vrstev. O procesu výroby skořepiny bude detailně pojednáno v kapitole 2.

1.3 Vytavování skořepiny

Po dokončení a vysušení skořepiny následuje vytavení vosku ze skořepiny. To lze provádět několika způsoby:

- A) Flash fire systém – provádí se v žíhací peci při teplotách 900-1000 °C, zároveň tedy dochází i k vyžhání skořepiny. Nevýhodou metody je ztráta vosku až 15 % spálením a znehodnocením dalšího vosku [11].
- B) Vytavování v mikrovlnném tunelu – při této metodě je skořepina navlhčena a umístěna do mikrovlnného tunelu. Působením mikrovln se rychle a rovnoměrně zahřeje, čímž se dosáhne efektivního vytavení vosku bez vzniku spalin, kouře atd. [11]
- C) Vytavování v autoklávu (bojlerklávu) – nejpoužívanější metoda vytavování, při níž je skořepina umístěna buď do tlakové nádoby (ideální tlak 10 bar), do které je přiváděna pára o teplotě 150 – 180 °C (autokláv), nebo je vyvíječ páry přímo integrován do tlakové nádoby (LBBC Boilerclave®). Klíčovým faktorem vytavování je rozdíl mezi tepelnou roztažností skořepiny a vosku. Vosky mají výrazně vyšší tepelnou roztažnost než materiál skořepiny, proto musí natlakování a zvýšení teploty probíhat vysokou rychlostí, aby vosk

při expanzi nezpůsobil prasknutí skořepiny. Dále je nutné, aby vosk neměl příliš vysokou viskozitu kvůli zajištění dostatečné penetrace vosku do skořepiny a vytvoření tenké vrstvy na jejím líci. Vytavovací cyklus trvá 10-15 minut, až 95 % vosku je poté možné rekonstituovat [4, 11].



Obr. 3 – Vkládání skořepin do LBBC boilerklávu [4]

1.4 Vyžihání skořepiny

Tato operace probíhá zpravidla při teplotách 850-1000 °C, teplota však může dosáhnout až 1500 °C v závislosti na typu odlévané slitiny. Cílem vyžihání skořepiny je odstranění zbytkového vosku (popela) a kapalin - voda vázaná v křemenném pojivu se zde může vyskytovat až do teplot nad 1000 °C. Jak bylo uvedeno v kapitole 1.1.1, obsah popela u vosků by neměl překročit 0,05 %. Dalšími efekty, dosaženými tímto procesem je předeřev formy (zbrzdí se tím krystalizace kovu na stěnách formy) a zpevnění formy překrystalizací SiO_2 . Způsob a doba žihání závisí na typu odlévané slitiny, případně typu krystalizace (řízená krystalizace). U slitin s nižší teplotou tavení, tedy i slitin na bázi hliníku, se tato teplota pohybuje maximálně kolem 850°C. Vyšší teplota by mohla způsobit příliš vysokou pevnost skořepiny a vznik trhlin.

Žihání se provádí v elektrických nebo plynových pecích. Pro umožnění důkladného spálení zbytkového vosku je třeba zajistit 8-10 % volného kyslíku v prostředí pece. U elektrických pecí jsou tyto podmínky zajištěny vhodnou ventilací pece. U plynových pecí je třeba regulovat intenzitu plamene a tím i množství spalovaného kyslíku [4, 11].

1.5 Odlévání

Při odlévání tekutého kovu je největší riziko vzniku vad odlitku. Skořepina je zpravidla odlévána ručně, slévač proto musí zajistit optimální a konstantní rychlost odlévání tak, aby se předešlo vnesení oxidických vrstev či strusky dovnitř skořepiny. Možné je ovšem nahrazení ručního odlévání robotem. Vtoková soustava je součástí keramické skořepiny, vtoková jamka pak plní i funkci nálitku. Pro dosažení optimální kvality odlitku musí vtokový systém splňovat tato kritéria:

- tavenina zaplní formu rychle klidně a s minimální turbulencí
- vytvořit teplotní gradient pro zajištění usměrněného tuhnutí
- odstranit strusku a nečistoty
- zabránit reoxidaci taveniny při plnění
- umožnit snadné připojení k modelům [4]

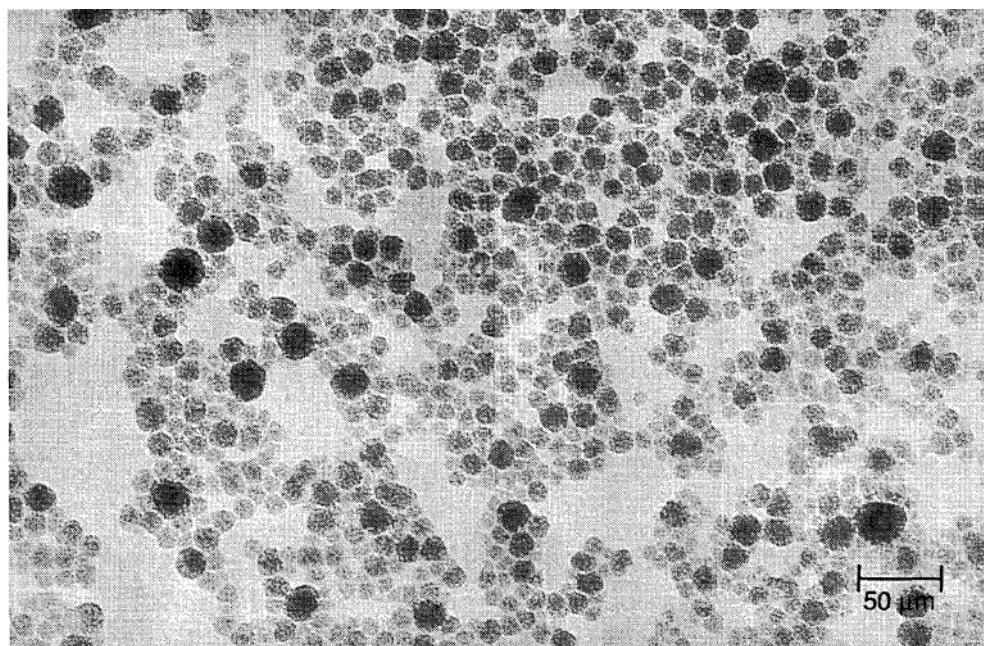
2 KERAMICKÁ SKOŘEPINA

Keramická skořepina tvoří obal voskového modelu. Skládá se z keramické břečky, složené z pojiva a plniva (případně přísad) a posypového materiálu. Prvním krokem výroby je namíchání břečky.

2.1 Struktura a vlastnosti keramické břečky

2.1.1 Pojiva keramických břeček

Pojiva jsou základním materiálem pro výrobu břečky. Skládají se z kapalné složky (na alkoholové nebo vodní bázi) a ze složky pevné, nejčastěji křemičité. Pevný podíl tvoří zpravidla 15–30 hm. % a v kapalné složce se nachází v koloidním stavu. Nejčastěji používanými pojivy jsou tzv. vodní koloidní křemičité soly. Pevné částice se ve slévárenských aplikacích svou velikostí pohybují mezi 7-30 nm, což způsobuje, že v kapalné bázi nesedimentují, ale volně se pohybují [4].

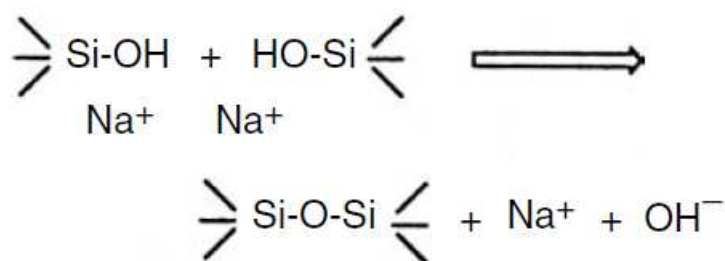


Obr. 4 – Struktura vodního koloidního křemičitého solu [4]

2.1.2 Výroba koloidních křemičitých solů

Soly musí být vyrobeny tak, aby byly stabilní – částice musí dosahovat vhodné velikosti, mít záporný náboj a sol nesmí samovolně přecházet na gel. Mezi používané metody výroby řadíme:

- A) Neutralizace rozpustných silikátů kyselinami – za zvýšené teploty je do roztoku vodního skla přidávána kyselina (např. H_2SO_4 , HCl), což vyvolá nukleaci částic SiO_2 . Kyselina je následně odstraněna dialýzou či elektrodialýzou a roztok je koncentrován do podoby solu.
- B) Metoda výměny iontů – zředěný roztok vodního skla s obsahem 2-6 % SiO_2 se nechá reagovat se speciální pryskyřicí, která zachytí atomy Na . Za přítomnosti zásaditého média ve vzniklém kyselém solu nukleují a rostou částice SiO_2 . Zředěný sol je následně koncentrován na obsah SiO_2 15-60 %. V současnosti se jedná o nejpoužívanější metodu výroby solů.

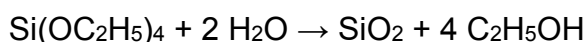


Obr. 5 – Vznik částic SiO_2 u metody výměny iontů [12]

- C) Peptizace gelu – v zásaditých podmínkách je neúplnou neutralizací křemičitanu sodného vytvořen silikagel. Následně je z gelu přidáním vody a vodního roztoku NaOH vytvořena břečka. Ta je ohřáta na 120-150 °C a gel peptizuje na sol.
- D) Hydrolýza sloučenin křemíku – výroba spočívá v hydrolyzaci alkylového silikátu v alkoholovém médiu s dostatečným množstvím vody a amoniaku. Touto metodou lze dosáhnout kulových částic o libovolné velikosti až do 1 μm .
- E) Rozpouštění křemíku – práškový křemík je za pomoci kyseliny fluorovodíkové zbaven oxidických filmů. Za přítomnosti vody v zásaditém médiu (zpravidla amoniaku) je následně vytvořen křemičitý sol, který je stabilizován zásadami.
- F) Disperze pyrogenního oxidu křemičitého – množství sloučeniny SiO_2+4HCl (pyrogenní oxid křemičitý) je spáleno za vzniku chlorovodíku (HCl) a výparů SiO_2 . Za přítomnosti tohoto redukčního činidla dále vzniká SiO v práškové formě. Tento prášek je následně smíchán s kapalným médiem za vzniku křemičitého solu [12, 13].

Důvodem užívání křemičitých *solů* je jejich schopnost ztuhnutí a přeměny na *gel*. V koloidním stavu se pevné částice volně pohybují v kapalné složce a navzájem se odpuzují vlivem elektrického náboje. V případě křemičitých solů se jedná o náboj negativní. Ačkoliv je tento stav stabilní, může dojít k narušení rovnováhy. V takovém případě se některé z nábojů změny na pozitivní a částice se začnou spojovat do trojrozměrných útvarů. Elektrický náboj částic závisí na pH kapalného média. Standardní pH vodních solů je přibližně 9,5 a jakákoli změna pH může způsobit gelaci. Protože se jedná o nevratný proces, je třeba pH měřit a udržovat pro zabránění znehodnocení břechky. Principem „řízené“ gelace po obalení a posypání modelu je sušení skořepiny a tím vypařování vody a koncentrace pevné části pojiva a částic plniva.

Proces spojování částic je často nazýván „stárnutím“ a má významné důsledky při udržování břechky. Významnými činiteli znehodnocování pojiva, a tedy i břechky, jsou soli, které se rozpouštějí za vzniku iontů, a tím dále přispívají k nerovnováze elektrických nábojů. Změna pH probíhá okamžitě po přidání plniva do pojiva a je znatelná při použití kyselých plniv. Znehodnocení však může být vyvoláno i vzdušným CO₂, tohoto procesu se ale záměrně nevyužívá; na podobném principu je založena vytvrzování skořepin s alkoholovými pojivy. Alkoholová pojiva jsou založena na ethylsilikátu, zpravidla ve formě koncentráту s obsahem asi 40 % SiO₂. Samotný ethylsilikát nemá pojivové vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou vyvolány reakcí ethylsilikátu s vodou dle následující rovnice:

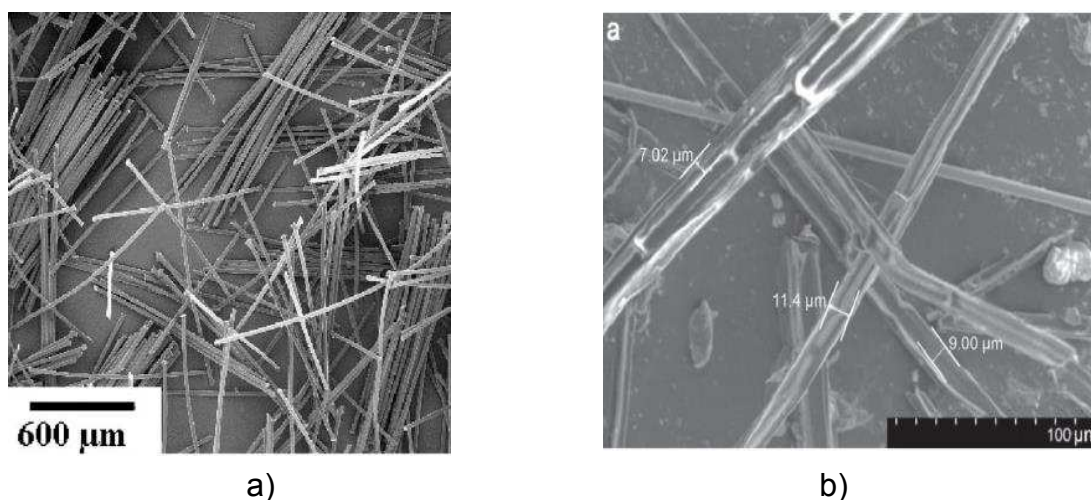


Produktem je ethanol a aktivní SiO₂, které spolu tvoří koloid s částicemi menšími než u vodních pojiv. Hydrolyza je silně katalyzována pomocí kyselin, které se přidávají do břechky k dosažení pH=2, kdy je sol stabilní (tzv. isoelektrický bod, kdy částice nenesou žádný náboj). Ke gelaci dochází při zvýšení pH na 7, čehož se dosahuje působením amoniaku [4].

Pro speciální odlitky (zejména ze slitin titanu) se využívá i pojiv na bázi Y₂O₃.

2.1.3 Aditiva s obsahem vláken

Pro zvýšení smáčivosti a přilnavosti břechky k modelu se, zvláště u modelů složitějších tvarů, používají přísady s obsahem jemných vláken. Tyto přísady zvyšují pevnost skořepiny v oblasti rohů, na ostrých hranách a při vytavování vosku. Díky zvýšené pevnosti je tak možné i snížit počet obalů. Materiál vláken může být např. polypropylen, PET a nylon nebo i organická vlákna z rákosu, kapoku či orobince. Dodávají se ve formě koncentrátů s obsahem latexu, surfaktantu (látka snižující povrchové napětí) a biocidu pro zabránění kontaminace břechky bakteriemi [14, 15, 16].



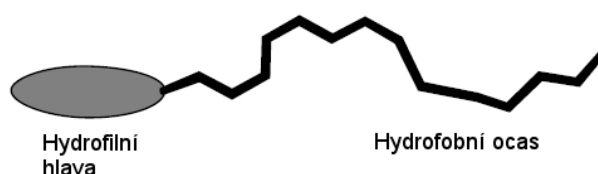
Obr. 6 – SEM snímek vláken – a) nylon, b) – orobincová vlákna [14, 15]

2.1.4 Surfaktanty

Surfaktanty neboli tenzidy jsou látky snižující povrchové napětí, čímž zvyšují přilnavost břečky k voskovému modelu a dále zvlhčují plnivo. Jedná se o amfifilické látky (obsahují hydrofilní i hydrofobní složku). Hydrofilní složka je označována jako „head group“ (hlava) a hydrofobní jako „tail“ (ocas). Když surfaktant adsorbuje z vodního roztoku na nesmáčivý povrch, v tomto případě vosk, hydrofobní část se natočí směrem k povrchu vosku a hydrofilní k roztoku – tím dojde ke snížení povrchového napětí mezi kapalinou a voskem. Vlastnosti surfaktantů jsou určeny typem hydrofilní složky. Ta může být:

- anionická
- kationická
- neionická
- zwitterionická

Průmyslově používané surfaktanty jsou zpravidla petrochemické nebo oleochemické sloučeniny. Dle doporučení společnosti REMET by se obsah surfaktantu v primárním obalu měl pohybovat v rozmezí 0,25 – 0,60 %, v dalších vrstvách pak 0,05 – 0,10 % [17, 18].



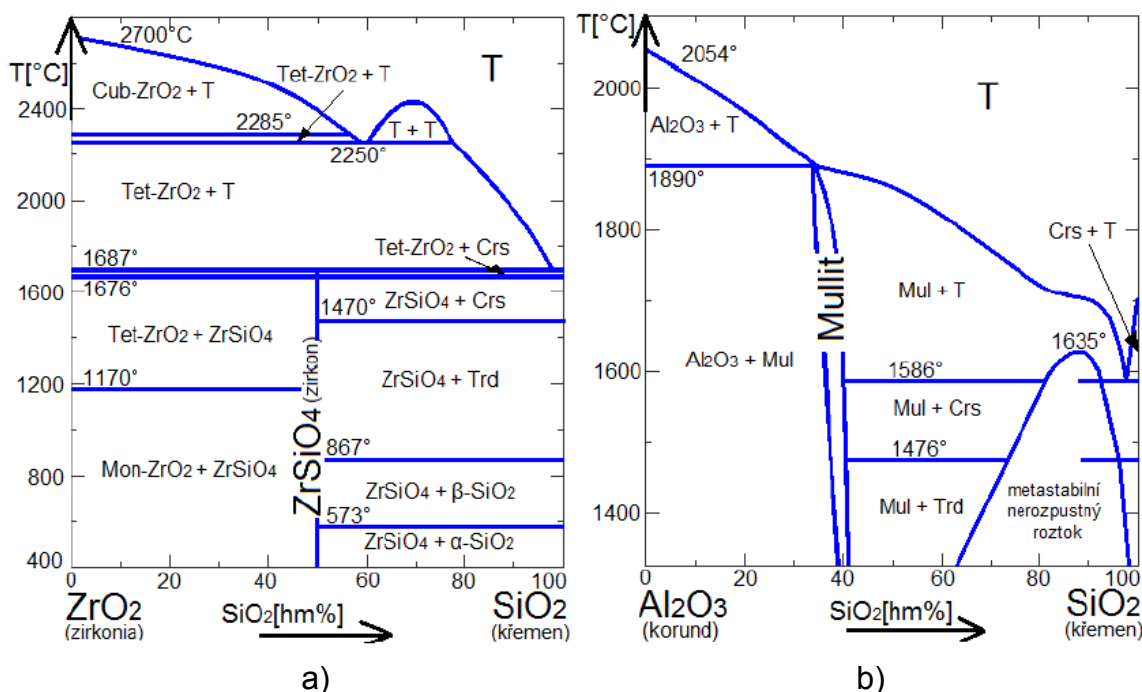
Obr. 7 – Struktura surfaktantu [18]

2.1.5 Aditiva zabraňující pění (antifoam)

Antifoam aditiva obsahují množství povrchově aktivních látek (jedná se tedy o druh surfaktantů). Jejich funkce spočívá v narušování rozhraní kapalina-vzduch v pění. Malé množství činidla je přidáváno přímo do pojiv při jejich výrobě, do primární břečky je pak třeba přidat takové množství aditiva (ne více než 0,05 hm. %), aby se zabránilo nežádoucím efektům. Tím je zejména nerovnoměrné tloušťka obalení voskového modelu. U back-up břečky může být množství vyšší (až 0,75 hm. %). Antifoam aditivum je do břečky přímo nebo zředěné ve vodě [19].

2.1.6 Plniva keramických břeček

Jako plniva jsou používány žáruvzdorné materiály, zpravidla na bázi $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ nebo $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2$. Lze je tedy popsat následujícími diagramy:



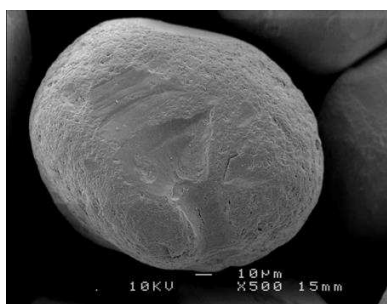
Obr. 8 – Fázové diagramy – a) zirkon-křemen, b) korund-křemen [20]

Klíčovými parametry hodnocení žáruvzdorných materiálů jsou:

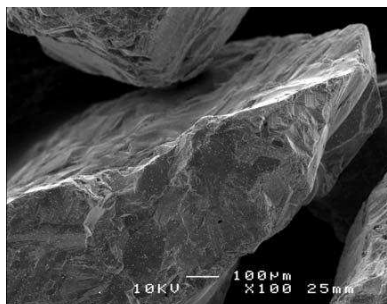
- hustota
- tvrdost
- tepelná roztažnost
- tepelná vodivost
- odolnost vůči tepelnému šoku
- chemická stabilita (odolnost vůči korozi)

Materiál plniv a posypů může být *odlišný nebo stejný, vždy se liší zrnitostí*. Běžně používanými plnivy (ostřivy) jsou:

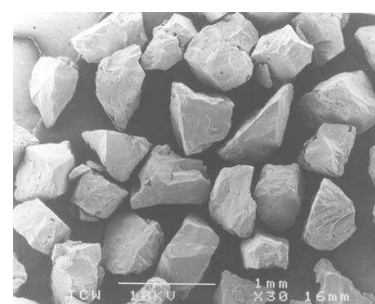
- A) Zirkonový písek – skládá se ze ZrO_2 a SiO_2 s malým množstvím HfO_2 . Z přírodních písků je získáván gravimetrickou, elektrostatickou či magnetickou separací. Částice písku jsou oválného až kulatého tvaru. Tepelnou stabilitu si udržuje až do $1680\text{ }^\circ\text{C}$ [20].
- B) Bílý tavený korund – skládá se z více než 99 % z Al_2O_3 se zbytkovým Fe_2O_3 a Na_2O . Je velmi tvrdý, použitelný pro vysoké teploty až $2054\text{ }^\circ\text{C}$ a disponuje vysokou tepelnou vodivostí. Vyrábí se tavením kalcinovaného korundu v obloukových pecích [20, 21].
- C) Hnědý tavený korund – typickým složením je $Al_2O_3 \approx 95\%$, $TiO_2 \approx 3\%$ a $SiO_2 < 1\%$. Výroba spočívá v redukcí bauxitu v elektrické obloukové peci. Žáruvzdornost je nižší než u bílého korundu (asi $1950\text{ }^\circ\text{C}$), může být modifikován pro nižší obsah TiO_2 [20, 22].



a)



b)



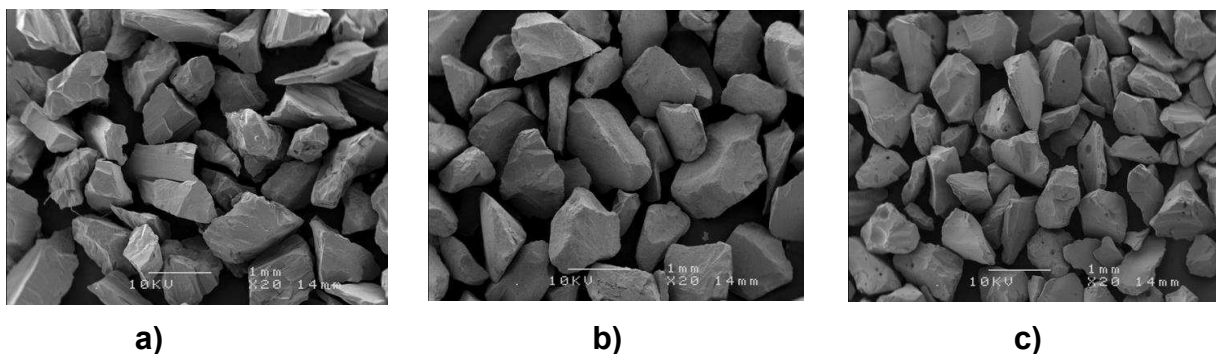
c)

Obr. 9 – a) Zirkonový písek, b) Hnědý tavený korund, c) Bílý tavený korund [20]

Dále jsou používány bublinový korund (vzniklý rychlým ochlazením po tavení) a tabulární korund, vyznačující se vysokou elektrickou vodivostí (v závislosti na množství až $3950\text{ }\mu\text{S/cm}$) a tvrdostí. U všech typů korundu se jedná o modifikaci α -korund.

- D) Tavený mullit – chemicky se jedná o $2Al_2O_3 \cdot SiO_2$ s hmotnostním podílem Al_2O_3 asi 76 %. Produkce probíhá spékáním čistého korundu a oxidu křemičitého v elektrické obloukové peci. Pro slévárství je výhodný nízkou teplotní roztažností a odolností proti tepelným šokům. Možná je také výroba zirkoniového mullitu, kde je SiO_2 nahrazen zirkonovým pískem [20, 23].
- E) Sintrovaný mullit – jedná se o mullit s obsahem $Al_2O_3 \approx 60-70\%$. Vyrábí se kalcinací rudy s vysokým obsahem korundu [20].
- F) Andalusit – obsahuje nižší podíl $Al_2O_3 \approx 58-60\%$. Při teplotách kolem $1200\text{ }^\circ\text{C}$ se transformuje na mullit, tato transformace ovšem díky malé tepelné roztažnosti nemá negativní účinky na kvalitu směsi. Vyznačuje se odolností vůči tepelnému šoku a malou penetrací kovu do směsi [20, 24].

- G) Molochit – aluminosilikátový materiál s obsahem asi 42 % Al_2O_3 . Je získáván kalcinací kaolinů. Má malou tepelnou roztažnost díky absenci cristoballitu. Žáruvzdorné vlastnosti si udržuje až do teplot 1750-1770 °C [20].
- H) Tavený křemen – tavicí teplota až 2000 °C, získává se tavením čistého křemene. Má nízkou tepelnou roztažnost, na rozdíl od jiných křemenných ostřiv, kde vlivem cristoballitické přeměny dochází k velké objemové expanzi [20].



a)

b)

c)

Obr. 10 – a) Tavený mullit, b) Molochit, c) Tavený křemen [20]

Zrnitost částic je udávána v jednotkách mesh, která je definována jako počet ok, která připadají na jeden palec (2,54 cm) drátového síta s otvory odpovídajícími průměru drátu [25].

Tab. 1 – Přepočítání jednotek MESH [25]

Velikost v MESH	Velikost v μm	Velikost v palcích
40	420	0,0165
80	177	0,0070
120	125	0,0049
200	74	0,0029
400	37	0,0015

Ve slévárenství jsou používány materiály o zrnitosti 120-325 mesh pro plniva a 8-140 mesh pro posyp. Detailnější rozdělení je uvedeno v tabulce 2:

Tab. 2 – Velikost částic [26]

Plnivo		Posyp	
Vrstva	Velikost v MESH	Vrstva	Velikost v MESH
1	200-325	1	80-140
2-3	200-120	2-3	30-80
Back-up	200-120	Back-up	16-30
Seal coat	200-120	Hrubý back-up	8-16/10-20

2.2 Příprava a udržování keramické břečky

Keramická břečka vzniká přidáním plniva do pojiva, případně aplikací aditiv. Za smíchanou se břečka považuje, když je každá částice plniva zcela obalena pojivem - není mezi nimi žádný vzduch.

2.2.1 Reologické vlastnosti a stabilizace břečky

Množství pojiva a plniva v břečce je určeno požadovanou (dynamickou) viskozitou. Protože břečky patří mezi tzv. neneutronovské kapaliny, viskozita závisí na mnoha odlišných parametrech.

Viskozita se měří už v průběhu míchání břečky, a to následujícími způsoby:

- A) Fordův pohárek – jedná se o výtokový pohárek s kalibrovaným otvorem na spodní straně, zpravidla o průměru 4 mm. Mírou viskozity je pak doba vyprázdnění po naplnění pohárku a uvolnění otvoru
- B) Zahnův pohárek – závěsný ocelový pohárek s kalibrovaným otvorem, mírou viskozity je (po naplnění pohárku) doba odtoku až po první narušení plynulého proudu kapaliny.
- C) Viskozimetry – fungující na různých principech: tlakový, kapilárový, rotační, kuličkový

Za stabilizovanou je břečka považována, když se viskozita mění (při měření Fordovým pohárkem) o méně než 1 s po každé hodině měření [27].

Míchání a udržování břečky probíhá v rotačních tancích různých druhů:

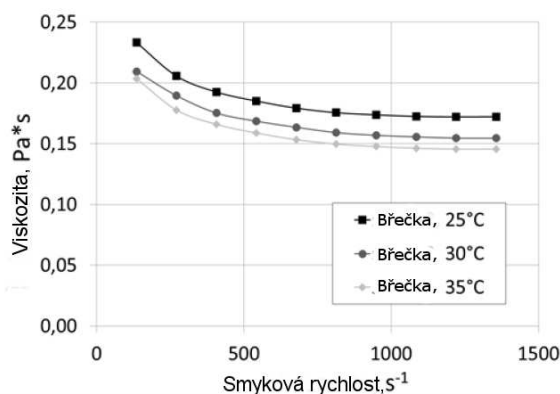
- A) S velmi nízkou rychlostí – jsou konstruovány jako uzavřené válcové nádoby, stabilizace břečky může trvat několik dní.
- B) S nízkou rychlostí (25-30 RPM) – používají se jako udržovací, nejsou doporučeny k přípravě břečky.
- C) Se střední rychlostí (<2000 RPM) – vhodné pro přípravu břečky, mohou být vybaveny časovačem a měničem rychlosti.
- D) S vysokou rychlostí (>2000 RPM) – pouze k přípravě břečky, hrozí zahřívání a degradace komponent, výhodou je krátký čas stabilizace [27].



Obr. 11 – Udržovací tank s nízkou rychlostí [27]

2.2.2 Parametry ovlivňující viskozitu

Reologické vlastnosti břeček jsou těsně svázané s teplotou, rychlostí míchání a druhem použitého pojiva a plniva. Výzkum J. Kolczykové ukázal, že se vzrůstající rychlostí (hodnotou tření) se snižuje viskozita břečky, stejně tak při vzrůstající teplotě [28].



Obr. 12 – Závislost viskozity na velikosti tření a teploty [28]

2.2.3 Kontrola a měření vlastností břechky

Břechku je třeba pravidelně kontrolovat, aby se předešlo jejímu znehodnocení a následnému vzniku vad na odlitcích. Některé zkoušky je doporučeno provádět denně (teplota, viskozita, pH, specifická hmotnost), některé pak týdně (obsah SiO_2 , obsah žáruvzdornin, celkové množství pevné složky) [29].

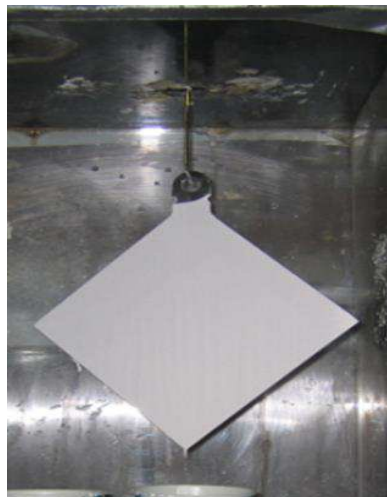
- A) Měření teploty – teplota břechky nesmí překročit 24 – 28 °C (podle druhu břechky), jinak může dojít k odpařování vody a gelaci, tepelnému znehodnocení pevných přísad nebo snížení viskozity a tím ke změně krycích vlastností [11].
- B) Měření pH – měření se provádí z důvodu prevence gelace břechky při změně pH. K měření je potřeba měřicí a referenční elektroda, které jsou dnes zpravidla kombinovány do jedné. Při tomto řešení je skleněná měřicí elektroda ve vnitřním prostoru elektrody referenční. Referenční elektroda má konstantní elektrický potenciál, potenciál druhé elektrody závisí na aktivitě iontů H^+ , tedy množství na pH. Mírou pH je tedy rozdíl potenciálu mezi elektrodami [30].



Obr. 13 – pH metr [31]

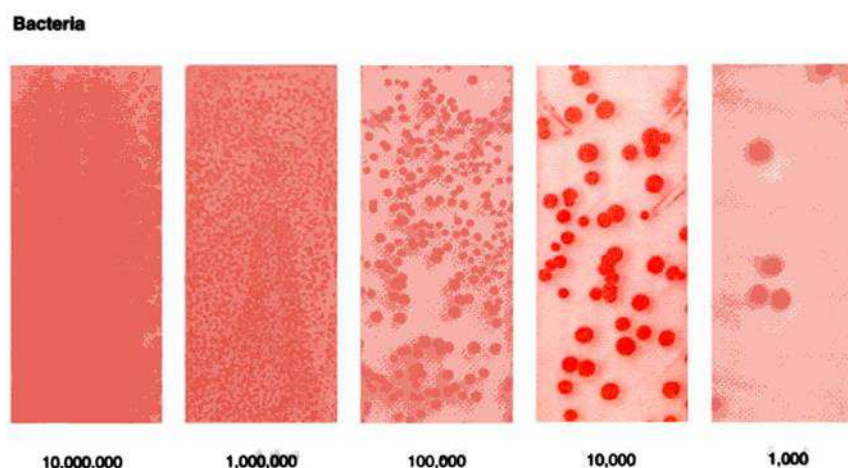
- C) Měření obsahu SiO_2 – pomocí centrifugy se odstředí dostatečné množství břechky (tak, aby zbylo aspoň 10 ml koncentrátu). Množství SiO_2 se určí zpravidla volumetricky – z rozdílu hmotností prázdného pyknometru a pyknometru naplněného odstředěným pojivem se určí měrná hmotnost pojiva a tím obsah SiO_2 . Možné je také použití hustoměrů. Toto měření není zcela přesné, jelikož břechka kromě SiO_2 obsahuje i množství polymerních látek [32].
- D) Plate weight test – tímto způsobem se měří krycí schopnost břechky. Používá se pro kontrolu primární břechky, která přímo obaluje voskový model. U odlitků složitých tvarů se volí nižší viskozita břechky, aby bylo zajištěno důkladné krytí modelu. Při testování se použije mosazný nebo bronzový plech o rozměrech 150x150 nebo 75x75 mm. Plátek se zváží a ponoří do vzorku břechky, odebrané z tanku a nechá se ponořený po určenou dobu. Je nutné, aby byl čas ponoření při každém měření stejný a aby byl plátek zcela ponořen. Po uplynutí této doby

se plátek vytáhne a zavěsí na měřicí zařízení. V této chvíli se každých 15 s po dobu 3 minut zapisuje hmotnost plátku. Výsledkem jsou křivky průběhu stékání břečky a výsledná hmotnost plátku [11].



Obr. 14 – Plate weight test [32]

- E) Měření množství bakterií – bakterie se zachycují na polymerních složkách pojiva a okyselují břečku, čímž mohou vyvolat gelaci. Zkoušení přítomnosti bakterií probíhá odstředěním dostatečného množství pojiva, do něhož se následně ponoří zkušební pásek. Ten se uzavře do speciální nádoby, kde se bakterie nechají růst. Podle přiložených etalonů se učí přibližný počet bakterií [32].



Obr. 15 – Stanovení množství bakterií [32]

- F) Antifoam test – testuje se účinnost činidel, zabraňujících pění. Zkušební zkumavka se asi do jedné třetiny objemu naplní břečkou, po uzavření se se zkumavkou 5 s prudce třepe. Vzniklá pěna by měla vymizet do 20 s [32].

- G) Wetting test – zjišťuje účinnost surfaktantu (smáčedla) na kvalitu krytí modelu. Voskový model nebo voskem obalený kelímek se ponoří do břečky s obsahem surfaktantu a povytažení se břečka nechá stéct. Hranice pokrytí břečky by měla být rovná a neměla by se trhat [32].



a)

b)

Obr. 16 – Wetting test – a) špatné pokrytí, b) dobré pokrytí [32]

- H) Měření obsahu žáruvzdornin – toto měření díky vysokým teplotám, za kterých probíhá, umožňuje stanovit přesný podíl žáruvzdornin v břečce. Do žáruvzdorného kelímku, který byl předtím zvážen se vleje určené množství břečky. Kelímek i s břečkou se opět zváží a na 1 hod se vloží do sušárny o teplotě $\approx 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (350 F). Po usušení se kelímek s usušenou břečkou opět zváží. Následně proběhne žíhání na $\approx 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1800 F) opět po dobu 1 hod. Kelímek s vyžíhanou břečkou se zváží a z naměřených hodnot se vypočte celkový podíl pevné složky a podíl žáruvzdornin v břečce [32].

2.3 Posyp a výroba keramické skořepiny

Výroba skořepiny začíná namáčením modelu do primární břečky. Namáčení může probíhat buď ručně nebo automatizovaně pomocí robotu. Robotické rameno kromě ponoření odlitku do břečky vykonává i rotační pohyb pro dosažení úplného obalení modelu. Po vytažení modelu z nádoby a stečení přebytečné břečky je model posypán. To se může uskutečnit dvěma způsoby:

- A) Fluidní posyp – stromeček je vložen do posypu, fluidizovaného vzduchem
- B) Sprchový posyp – stromeček je vložen do sprchového zařízení, které jej shora sprchuje ostřivem, pro dosažení úplného pokrytí je tedy třeba stromečkem otáčet

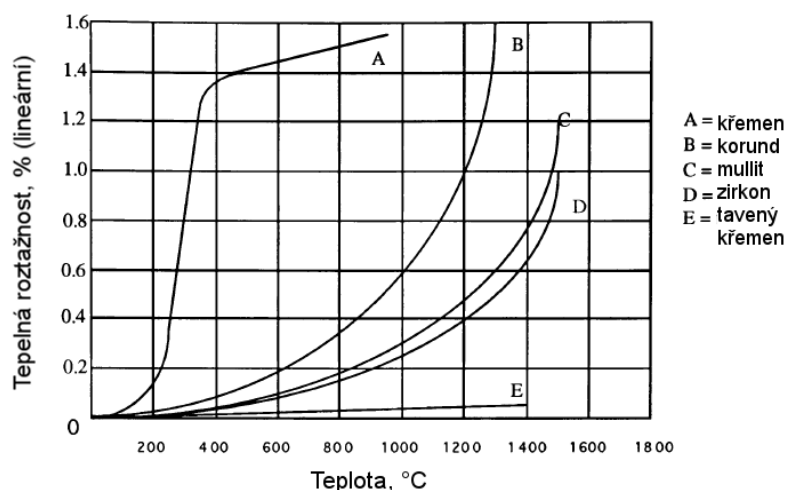
Materiál posypu nemusí, ale může být shodný s materiálem plniva břečky. První až druhá vrstva ostřiva má nižší zrnitost 30-140 mesh (viz tab. 2) a slouží k přesnějšímu

obalení modelu a dosažení vyšší kvality povrchu. Další obaly o hrubší zrnitosti až 8 mesh slouží ke zvýšení prodyšnosti formy a tím k lepšímu odvodu plynů při lití. Po každém obalu následuje sušení. To by mělo probíhat při teplotě $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ a vlhkosti 40-50 %. Podmínky sušení je ale třeba zvolit podle typu posypu [11, 27].

2.3.1 Tepelné vlastnosti skořepin

Na tepelných vlastnostech žáruvzdornin zásadně závisí kvalita keramické skořepiny a tím i kvalita výsledného odlitku. Všechny tepelné vlastnosti keramických skořepin závisí na míře jejich porozity.

- A) Tepelná roztažnost – míra lineární rozměrové stability po vystavení vysokým teplotám a následném ochlazení. Většina žáruvzdorných materiálů po zahřátí zvětšuje své rozměry. Měření probíhá pomocí dilatometru.



Obr. 17 – Tepelná roztažnost žáruvzdornin [13]

- B) Odolnost vůči tepelnému šoku – míra odolnosti žáruvzdorného materiálu vůči střídavému ohřívání a ochlazování. Závisí na druhu žáruvzdorniny a pojivového systému. Lepší odolnost vůči tepelnému šoku vykazují skořepiny s obsahem mikrotrhlin.
- C) Tepelná vodivost – představuje rychlost, s jakou se šíří teplo od zahříváné do chladné části při vystavení tepelnému záření [33].

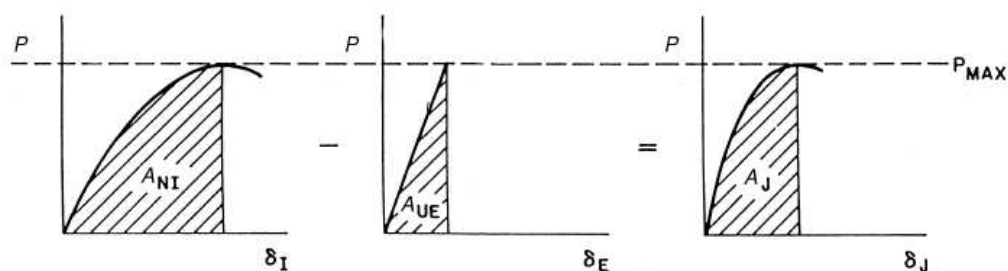
2.4 Kontrola a měření vlastností skořepiny

2.4.1 MOR (Pevnost v ohybu)

Pevnost žáruvzdornin je zpravidla určována pomocí zkoušky tříbodového ohybu. Tato zkouška je založena na vztahu

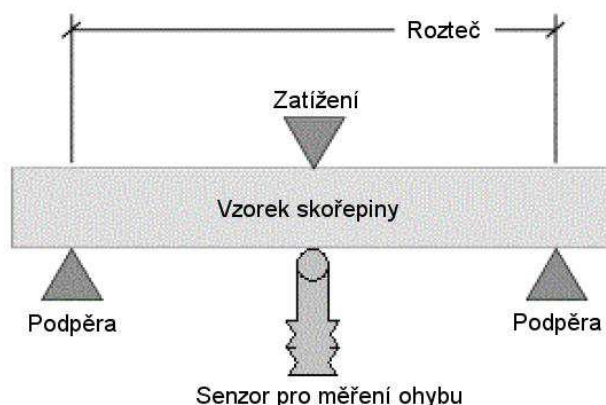
$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \text{ [MPa]} \quad (2.1)$$

kde P značí zatížení při lomu, L rozteč podpor, b délku vzorku a h tloušťku vzorku. Zkušebními vzorky jsou destičky obdélníkového tvaru o definovaných rozměrech. Kromě samotných vlastností žáruvzdorniny výsledek závisí i na způsobu přípravy vzorku a rychlosti zatěžování. Tento způsob měření pevnosti je zjednodušený, nejpřesnějších výsledků se dosáhne pouze, když je tahová křivka až do okamžiku lomu lineární (viz obr. X uprostřed). Běžně se ovšem tahové křivky keramických vzorků nestanovují.



Obr. 18 – Tahové diagramy [33]

Skořepiny jsou testovány buď v nevyžíhaném stavu (cold MOR) nebo vyžíhané (hot MOR). V důsledku degradace pojiva se maximum pevnosti u žáruvzdornin vyskytuje při vyžíhání mezi 600–1400 °C, v závislosti na typu žáruvzdorniny a konkrétním chemickém složení. Po překročení tohoto maxima materiál rapidně ztrácí pevnost, je však také výrazně méně křehký [11, 33].



Obr. 19 – Zkouška MOR [11]

2.4.2 Zkouška prodyšnosti

Prodyšnost se stanoví pomocí skořepiny vyrobené za pomoci standardního míčku pro stolní tenis o průměru 40 mm, keramické nebo skleněné trubice o minimální délce 250 mm, průměru 8 mm a tloušťce stěny 1,5 mm a lepidla, nereagujícího s míčkem. Postup výroby skořepiny je následující:

1. Vyvrtat 8 mm díru do míčku
2. Trubici vložit do míčku na délku 10 mm a upevnit lepidlem
3. Nechat lepidlo ztvrdnout
4. Provést zkoušku na těsnost, zejména lepeného spoje – ponoření míčku pod vodu a vhánění vzduchu
5. Vyrobit skořepinu – míček s trubicí slouží jako model

Míček je následně odstraněn – nejdříve je skořepina ohřáta na 300 °C s 1h prodlevou na 175°C a potom vyžehána na požadovanou teplotu. Pomalé ohřívání skořepiny zabraňuje iniciaci trhlin, případně i náhlému zapálení míčku a explozi. Samotné měření je prováděno za zvýšeného tlaku 300 nebo 500 mbar za pokojové nebo zvýšené teploty [34].

2.4.3 Dilatometrie

Pomocí tohoto měření je určena tepelná roztažnost a rozměrová stabilita skořepiny. Princip zkoušky spočívá ve zhotovení vzorků skořepiny ve tvaru hranolu, které jsou následně vloženy do trubice o průměru 5 mm. Pro zamezení pohybu jsou vzorky přitlačeny pístem. Takto zhotovené vzorky jsou vloženy do pece s danou rychlostí ohřevu a konečnou teplotou. V průběhu ohřevu je zaznamenávána závislost velikosti relativní roztažnosti na teplotě skořepiny [11].

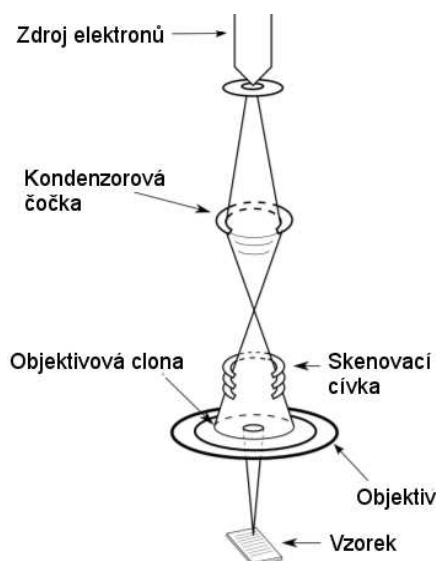
2.4.4 Laser flash analysis – zkouška tepelné vodivosti

Nejprve je zhotoven vzorek (ve tvaru kruhu nebo čtverce) o tloušťce ≈ 3 mm a průměru 10 mm nebo 20 mm. Následně je změřena hustota vzorku a poté zhotovena grafitová vrstva pro zabránění odrazu laseru v průběhu měření. Připravený vzorek se vloží do komory, která je evakuována (po dobu 10 minut) a pak profouknuta inertním plynem. Poté následuje druhé, kratší, vakuování (5 minut) a zapnutí konstantního toku inertního plynu (argonu). Vzorek je z jedné strany ohříván laserem, detektor na druhé straně zaznamenává průběh změny teploty na čase. Výsledkem měření jsou křivky tepelné vodivosti [11].

2.4.5 SEM analýza výbrusů skořepin

SEM (skenovací elektronová mikroskopie) využívá účinku urychleného svazku elektronů na vzorek. Tento svazek je směřován do velmi malého bodu a povrch vzorku je řádek po řádku skenován. Tím dochází k ovlivnění oblasti pod povrchem skenovaného vzorku – interakcí primárních elektronů a preparátu jsou emitovány sekundární elektrony, které se náhodně pohybují a dopadají na scintilátor s fotonásobičem. Takto jsou získány informace o složení a charakteru povrchu. Vzorky je možné pozorovat v řadě podmínek včetně vakua a kryogenních a zvýšených teplot.

Příprava vzorku, závisí na typu pozorovaného materiálu, v laboratořích ITC společnosti IMERYS, jsou keramické vzorky po vyleštění zataveny do pryskyřice [35, 36].



Obr. 20 – Skenovací elektronová mikroskopie [36]

2.5 Vady keramické skořepiny

Tyto vady souvisejí se způsobem namáčení a manipulací voskového modelu a také s pevností skořepiny.

- A) Prasklá (zborcená) skořepina vlivem mechanického poškození – Vzniká vlivem nesprávné manipulace s voskovým modelem v průběhu obalování nebo při vytavování. Nárazem skořepiny do udržovacího tanku, posypového zařízení nebo autoklávu může dojít k částečnému prasknutí nebo úplnému zborcení skořepiny. Pokud je na stromečku více modelů a poškozen je jenom jeden nebo některé z nich, je možné defekt opravit a skořepinu použít. Vadě je možné předejít zvýšenou opatrností při manipulaci s modely a skořepinami.
- B) Prasklá (zborcená) skořepina vlivem nízké pevnosti formy – vlivem špatného technologického posypu při obalování nebo posypu vzniká nerovnoměrná tloušťka obalu, což způsobuje rozdílné hodnoty pevnosti a vyšší náchylnost k praskání. Dalšími příčinami snížené pevnosti může být také příliš nízký počet

obalů nebo přímo kvalita břečky nebo posypu. Tyto defekty se nejčastěji vyskytují u špatně dostupných míst, jako jsou žebra, kouty, dutiny. Při lití pak na těchto místech skořepina nejčastěji praská. Vadu lze odstranit volbou správného počtu obalů, správného způsobu obalování pro zajištění homogenní tloušťky na všech místech a zajištěním vysoké kvality břečky a posypu [37]

2.6 Vady odlitku související s kvalitou skořepiny

Nedbalá příprava břečky, použití aditiv a nesprávný způsob namáčení voskového modelu může vést k řadě vad. Čerstvě namíchaná břečka obsahuje značné množství vzduchu, proto by se měla vždy přemístit do udržovacího tanku, kde bude probíhat namáčení modelů. Vzduch se také může udržovat ve shlucích žáruvzdorných částic, v tomto případě se uvolní v průběhu míchání při zvlhčení plniva pojivem. Hlavními typy vad souvisejícími s kvalitou břečky jsou:

- A) Bubliny – jedná se o pravidelné dutiny kulového tvaru nacházející se na povrchu odlitku, mohou být způsobeny nedostatečnou smáčivostí břečky, vysokou viskozitou břečky, nízkou prodyšností, špatnou technikou namáčení modelu nebo zachycením vzduchu v břečce při přípravě. Řešením může být snížení viskozity břečky, přidání surfaktantu (smáčedla) nebo vyhledání a odstranění bublin již v průběhu obalování. Výskyt bublin však může souviset i s metalurgickou kvalitou taveniny.
- B) Penetrace posypu – může být způsobena řadou faktorů, mezi nimi např. slabá vrstva břečky, příliš hrubý posyp, umístění sprchového zařízení příliš vysoko nad model, pěnění břečky nebo lokální mikrogelaci břečky. V závislosti na konkrétní příčině vady může být řešením např. zvýšení viskozity břečky, použití jemnějšího posypu, úprava míchání nebo přidání antifoam činidla.
- C) Oxidace odlitku způsobená praskáním skořepiny – vlivem nesprávných podmínek při sušení, špatné kvality břečky nebo změny teploty dochází k praskání skořepiny v průběhu sušení. Vzniklými mikroprasklinami potom může vnikat vzduch, způsobující oxidaci odlitku a v případě větších prasklin může dojít i k zatečení kovu. Vadě lze předejít úpravou podmínek sušení (zvýšení vlhkosti, snížení rychlosti proudu vzduchu), udržováním optimální kvality břečky a zajištěním konstantní teploty při obalování a sušení.
- D) Odtržení primárního obalu – může být způsobeno špatnou přilnavostí obalu, přesušením vnějšího povrchu obalu nebo naopak nedostatečným sušením povrchu vnitřního, nesprávným obalením v rozích nebo změnami teploty. Řešením vady může být snížení vlhkosti při sušení, důkladné očištění modelu před obalováním, zajištění konstantní teploty a optimalizace způsobu stékání břečky pro zabránění jejího shlukování v rozích.
- E) Nepravidelný výronek v koutech a dutinách – vzniká v důsledku nehomogenity tloušťky obalu po nesprávném obalování. Při aplikaci první nebo druhé vrstvy obalu nebyla břečka správně okapána, případně byla špatně zvolena její viskozita. Pokud výronek vznikne v dutině, je příčinou slabé uchycení posypového materiálu v oblasti dutiny. Posyp pak dutinu pouze zužuje, následně

pak do dutiny vniká jen břecha a posyp téměř ne, což brání vzniku kvalitní obalové vrstvy. Při následném odlévání pak tavenina vniká mezi nesprávně vyrobené vrstvy obalu a vytváří nepravidelné výronky. V extrémních případech může dojít až k tomu, že tavenina zcela vyteče ven a nedojde k zaplnění formy. Tomuto defektu lze přejít volbou optimální viskozity břechky, důkladným namáčením v břechce a odstraněním přebytečného posypu, který již nezvyšuje pevnost skořepiny.



Obr. 21 – Výronek v koutu odlitku

- F) Nepravidelný výronek v ostrých koutech nebo rozích – příčinou je nesprávné nanesení prvního nebo druhého obalu v kombinaci s nepříznivou geometrií modelu. Tyto vady vznikají v ostrých koutech nebo podél ostrých hran, kde se při obalování zachycuje vzduch. Po aplikaci posypu se vzduchová kapsa uzavře a dojde ke vzniku dutiny. Během lití je pak kapsa vyplněna taveninou, což může způsobit omezení funkce odlitku. Řešením toho defektu je úprava konstrukce ostrých rohů zaoblením nebo zkosením. Pokud úprava konstrukce není možná, je nutné důkladnější namáčení v břechce tak, aby se zabránilo vzniku dutin.
- G) Podélný výronek – tato vada se vyskytuje na hranách nebo plochách odlitků, zejména pak na rozměrných a silnostěnných odlitcích. Způsobuje ji nedostatečná teplota voskového modelu – obalování pak není prováděno za konstantní teploty. Zejména při výrobě 1.-3. vrstvy je pevnost obalu ještě malá a vlivem změny teploty může dojít k roztržení formy. Další příčinou může být příliš nízká rychlost ohřevu při vytavování, kdy je skořepina roztržena vlivem vyšší teplotní roztažnosti vosku. Při odlévání pak tekutý kov vniká do trhliny a vytváří výronek. Pokud je trhlina ve skořepině obzvláště velká, může dojít i k úplnému vytečení kovu z formy. Této vadě se dá předcházet dostatečnou aklimatizací voskových modelů a udržováním konstantní teploty při obalování. Pokud k roztržení dochází při vytavování, je třeba zajistit správné nastavení rychlosti ohřevu v autoklávu.

- H) Zadrobeniny – jedná se o dutiny nepravidelného tvaru, nacházející se na povrchu nebo uvnitř odlitku. Často jsou v nich usazeny zbytky keramické formy. Tato vada zpravidla souvisí s vadou „výronek“. Po utržení části obalové směsi se částice dostávají do taveniny a vytvoří zadrobeniny. Jinou příčinou může být zanesení nečistot do skořepiny nebo neopatrná manipulace.
- I) Krupičky – povrch odlitku je pokryt kuličkami ztuhlého kovu. Důvodem je vnik kovu do vzduchových bublin, zachycených v primární nebo krycí břečce. Vada také může souviset se špatným odmaštěním voskových modelů a následného omezení smáčivosti modelu a břečky.
- J) Dolíčková a kanálková koroze – na povrchu odlitku se vyskytují půlkulové dutiny nebo kanálky s různou hloubkou. Důvodem je reakce některých slitin s SiO_2 a vzdušným kyslíkem. Předějit této vadě lze odléváním ve vakuu nebo volbou jiných žáruvzdornin pro výrobu skořepiny [29, 37, 38].

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Zkoušky vyrobených skořepin byly provedeny v laboratoři ITCA společnosti IMERYS ve Villachu (Rakousko). Uskutečněny byly tři typy zkoušek:

- MOR (zkouška třibodovým ohybem)
- Prodyšnost za pokojové teploty
- Vyhodnocení výbrusů skořepin pomocí SEM

Vyhodnocení praskání skořepiny a výsledné kvality odlitků bylo provedeno přímo ve slévárně MESIT Foundry, a.s. v Uherském Hradišti. Experiment byl rozdělen na 2 etapy. Způsob výroby v těchto etapách se lišil:

- recepturou břečky
- typem a způsobem posypu
- způsobem obalování (roboticky nebo ručně)
- délkou sušení

3 ETAPA 1

V této části byl zhodnocen původní stav výroby skořepiny.

3.1 Výroba skořepiny

Primární obal je u všech druhů skořepiny shodný. Posyp byl v případě robotické linky aplikován sprchově, u ručního obalování pak pomocí fluidizovaného vzduchu. Mírné sušení probíhalo na volném vzduchu rychlostí 1 obalu za den, intenzivním sušením byly vysušeny 2 obaly denně se zvýšenou cirkulací vzduchu. Sušení na lince má proměnlivou rychlost v závislosti na typu vyráběné skořepiny.

Rozpis receptury obalů obsahuje informace o:

- A) Typu pojiva – Primecote, MatriXsol 30, Granisol
- B) Typu aditiv – MXC Excel concentrate, MXC Excel X2 blend
- C) Typu plniva a posypu – Mulgrain, Molochite
- D) Viskozitě břečky – udáváno v sekundách

3.2 Původní složení skořepiny

Tab. 3 – Složení skořepiny Ransom & Randolph 1

Skořepina	Ransom & Randolph 1		
Obal 1	Primecote + Mulgrain 60 325, Molochite 50/80, 29s		
Obal 2	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s		
Obal 3	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s		
Obal 4	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 200, Molochite 16/30, 14s		
Obal 5	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 200, Molochite 16/30, 14s		
Způsob obalování	robot (7 vrstev)	ručně	
Označení	A	1	5
Sušení	linka	mírné – obal 1, 2 a 3	intenzivní
Kusů (stromků)	6 (3)	10 (5)	10 (5)

Tab. 4 – Složení skořepiny Granisol 1

Skořepina	Granisol 1		
Obal 1	Primecote + Mulgrain 60 325, Molochite 50/80, 29s		
Obal 2	Granisol 30 + Molochite 200 , Molochite 50/80, 13s		
Obal 3	Granisol 30 + Molochite 200, Molochite 30/80, 14s		
Obal 4	Granisol 30 + Molochite 200, Molochite 16/30, 15s		
Obal 5	Granisol 30 + Molochite 200, Molochite 16/30, 15s		
Způsob obalování	ručně		
Označení	3	7	
Sušení	mírné – obal 1, 2 a 3	intenzivní	
Kusů (stromků)	10 (5)	10 (5)	

Tab. 5 – Složení skořepiny Ransom & Randolph 2

Skořepina	Ransom & Randolph 2	
Obal 1	Primecote + Mulgrain 60 325, Molochite 50/80, 29s	
Obal 2	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s	
Obal 3	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s	
Obal 4	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 200, Molochite 30/80, 14s	
Obal 5	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 200, Molochite 30/80, 14s	
Způsob obalování	ručně	
Označení	2	6
Sušení	mírné – obal 1, 2 a 3	intenzivní
Kusů (stromků)	10 (5)	10 (5)

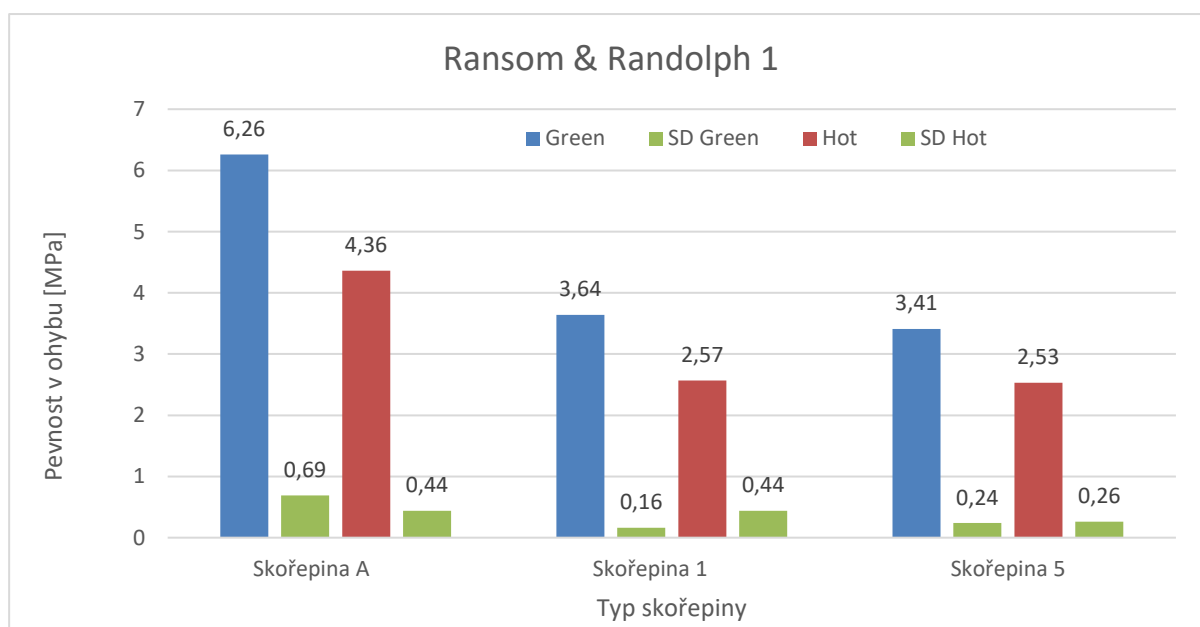
Tab. 6 – Složení skořepiny Granisol 2

Skořepina	Granisol 2	
Obal 1	Primecote + Mulgrain 60 325, Molochite 50/80, 29s	
Obal 2	Granisol 30 + Molochite 200 , Molochite 50/80, 13s	
Obal 3	Granisol 30 + Molochite 200, Molochite 30/80, 14s	
Obal 4	Granisol 30 + Molochite 200, Molochite 30/80, 15s	
Obal 5	Granisol 30 + Molochite 200, Molochite 30/80, 15s	
Způsob obalování	ručně	
Označení	4	8
Sušení	mírné – obal 1, 2 a 3	intenzivní
Kusů (stromků)	10 (5)	10 (5)

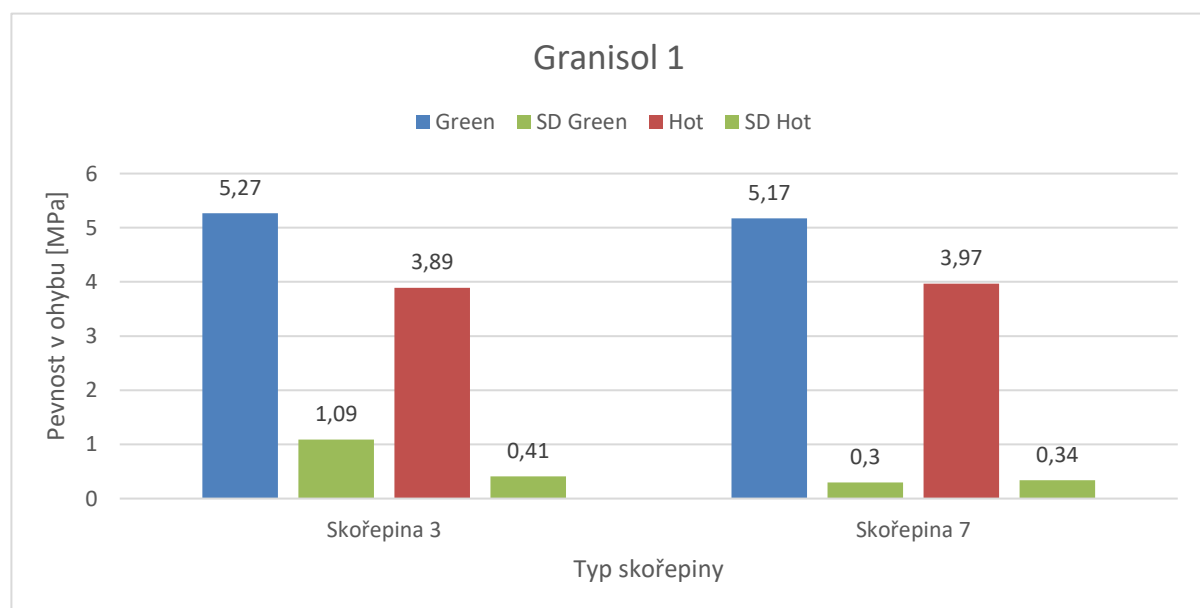
Složení primárního obalu a posypu bylo u všech typů skořepiny stejné. U posledních dvou skořepin byl modifikován posyp z Molochite 16/30 na Molochite 30/80. U skořepiny A je zvýšen počet obalů na 7 za použití obalu 4.

3.2.1 Měření pevnosti MOR

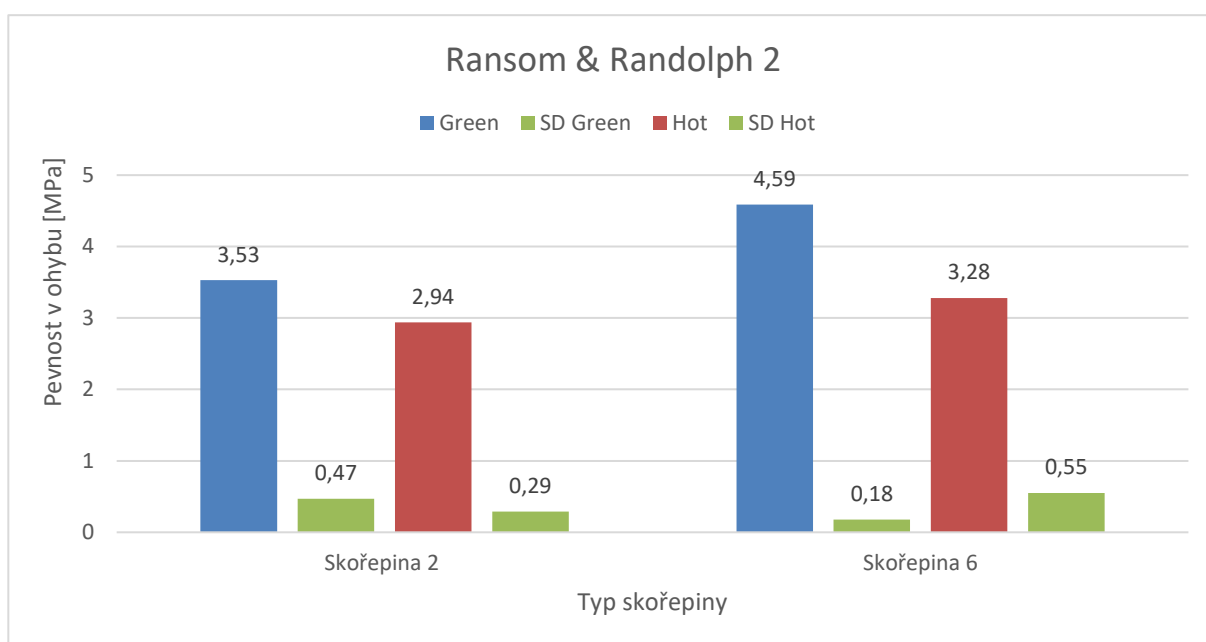
Pro tuto zkoušku byly zhotoveny vzorky skořepiny o standardních rozměrech 20x70 mm. Měření bylo prováděno v nevyžíhaném i vyžíhaném stavu. Pro měření byl použit přístroj Hegewald & Peschke Inspekt 10 Table Blue. Rychlost zatěžování byla 0,5 mm/min. V obou etapách a u všech typů skořepiny bylo zhotoveno 6 (případně 5) vzorků, hodnoty pevnosti uvedené v tabulkách jsou průměrnými hodnotami pevnosti jednotlivých vzorků. Vzorky označené jako „hot“ byly vyžíhány, „green“ označuje stav za syrova. SD je směrodatná odchylka měření. U všech vzorků byl proveden test normálního rozdělení a test pro vyloučení odlehlých hodnot.



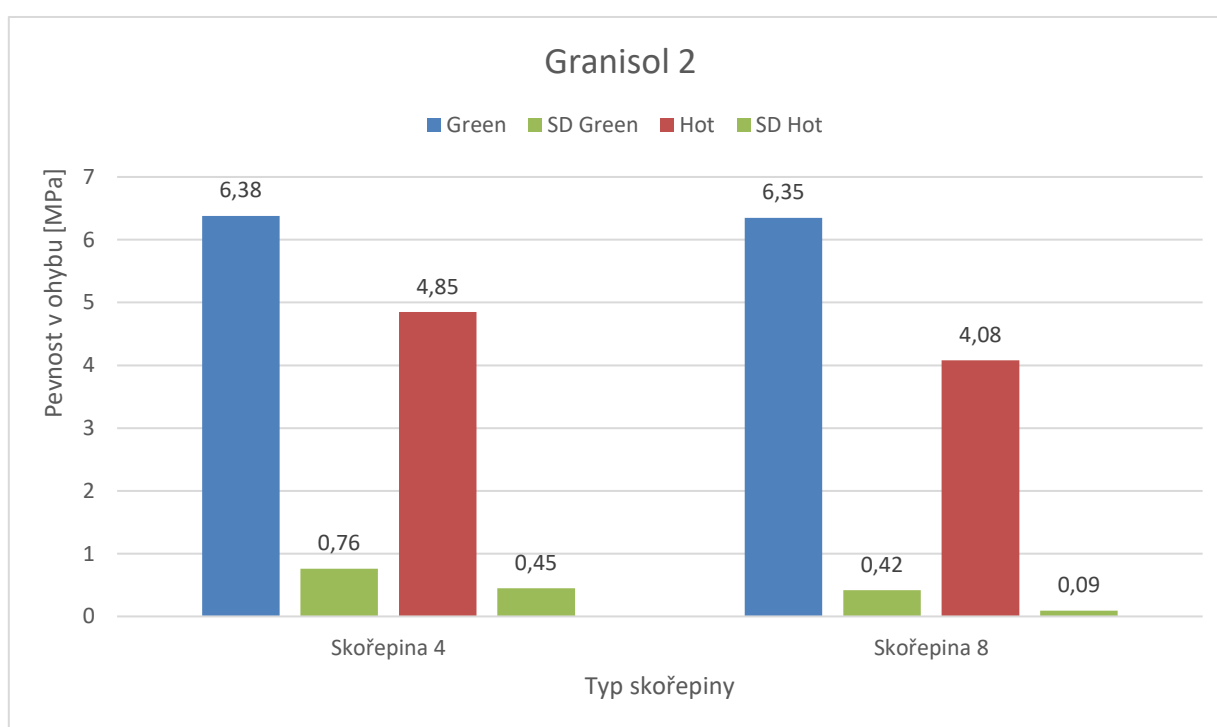
Obr. 22 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph 1 (viz Tab. 3)



Obr. 23 – Pevnost skořepiny Granisol 1 (viz Tab. 4)



Obr. 24 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph 2 (viz Tab. 5)



Obr. 25 – Pevnost skořepiny Granisol 2 (viz Tab. 6)

Pevnost po vyžihání byla ve všech případech nižší než pevnost za syrova. Nejnižší průměrné pevnosti (2,57 a 2,53 MPa) byly naměřeny u skořepiny 1 (Ransom & Randolph 1, ruční obalování, mírné sušení) a u skořepiny 5 (Ransom & Randolph 1, ruční obalování, intenzivní sušení). V obou případech byly vzorky vyžihány.

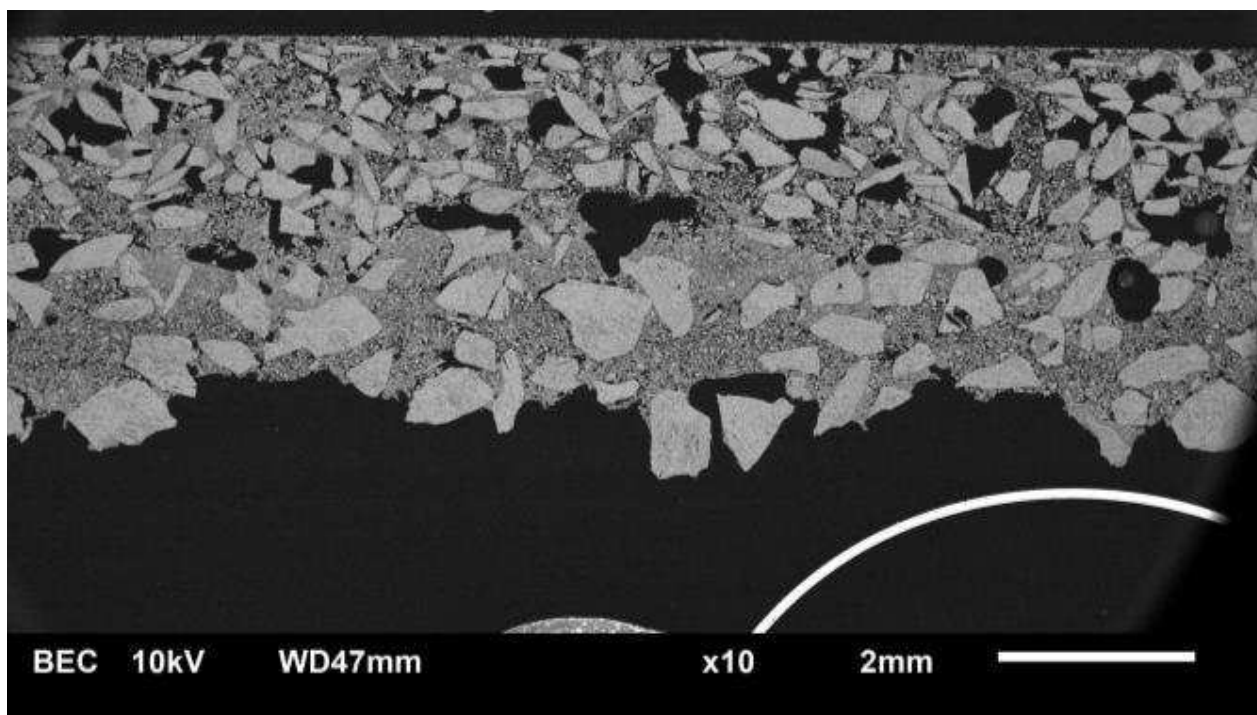
Oproti tomu při použití stejné břečky, robotického obalování a sušení na lince bylo dosaženo 3. nejvyšší hodnoty pevnosti (skořepina A, 6,26 MPa). Nejvyšších pevností dosahovala skořepina 4 a 8 (6,38 a 6,35 MPa). Obě tyto skořepiny byly vyrobeny za použití břečky Granisol 2 a ručního obalování. Skořepina 4 byla sušena mírně a skořepina 8 intenzivně. V případě pevností po vyžíhání nejvyšších pevností dosahovaly skořepiny 4 a A, zde s hodnotami 4,85 a 4,36 MPa.

Vyšší pevnost skořepin 4 a 8 pravděpodobně souvisí s vyšší viskozitou použitých břeček, především u obalů 2 a 3.

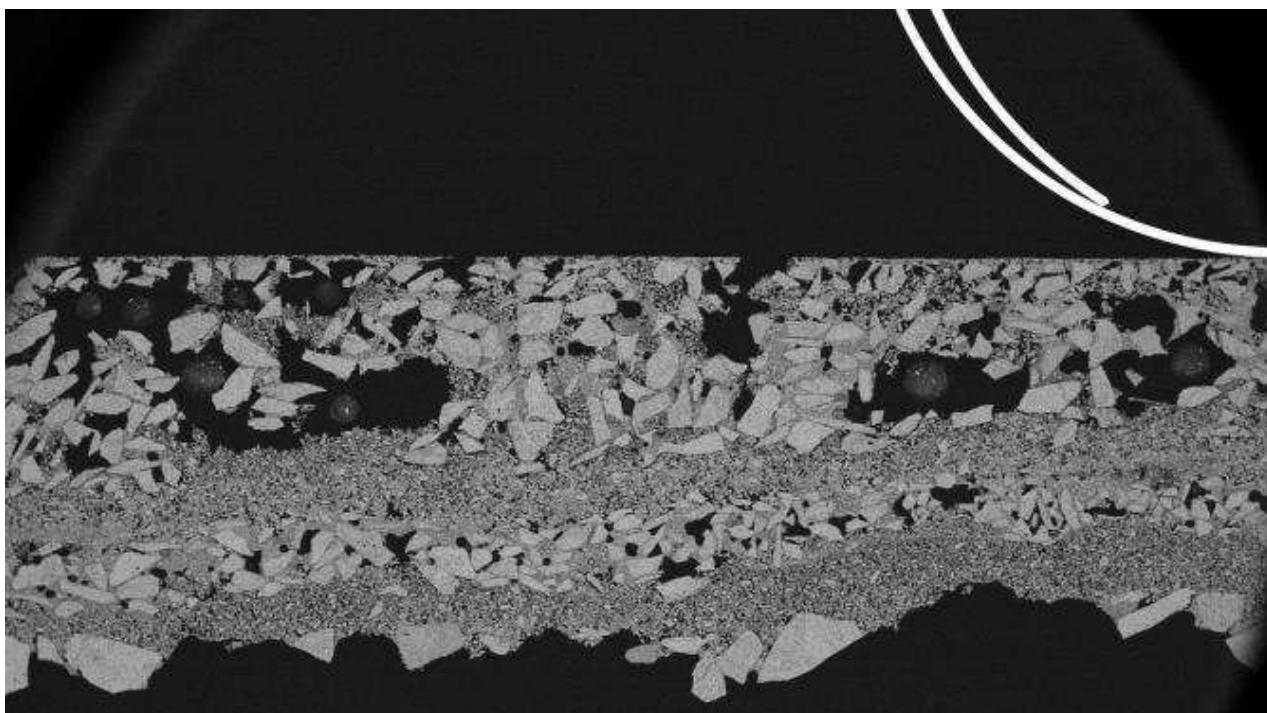
3.2.2 SEM analýza

Kvůli náročnosti přípravy a ceně vzorků pro SEM byly v etapě 1 zhotoveny pouze 2 výbrusy, konkrétně skořepiny 1 green a 1 hot.

Skořepina 1 je velmi porézní, v nevyžíhaném stavu jsou špatně rozeznatelné jednotlivé vrstvy obalu. Vrstva primární břečky je příliš tenká, posyp primárního obalu je příliš hrubý, což zřejmě vedlo k vysoké porezitě a delaminačnímu účinku. Na výbrusu vyžíhané skořepiny můžeme pozorovat nehomogenitu obalů. Jasně viditelné jsou vrstvy břečky následované vrstvami posypu. Vidět je zde také značná porezita, v několika případech dosahující až k okraji primárního obalu. Nehomogenita skořepiny v kombinaci s vysokou porezitou pravděpodobně zapříčinila nízké hodnoty pevnosti.



Obr. 26 – Výbrus skořepiny 1 green



Obr. 27 – Výbrus skořepiny 1 hot

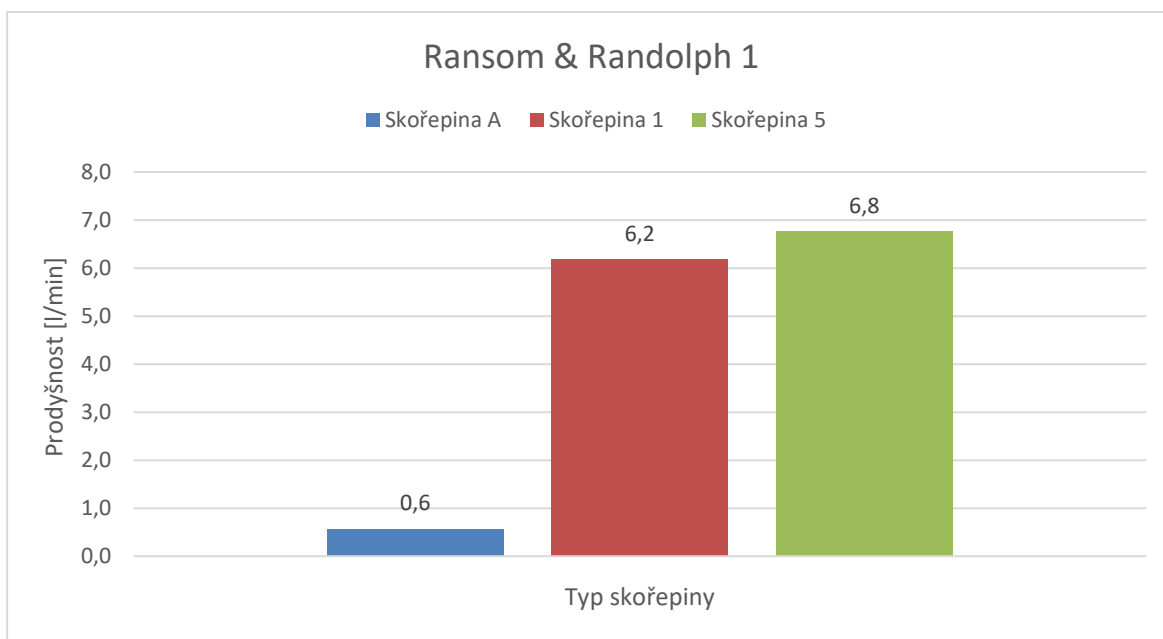
Porozita skořepiny přímo souvisí s dosaženou pevností Ryshkewitch-Duckworthovým vztahem:

$$\sigma = \sigma_0 * e^{-BP} \text{ [MPa]} \quad (3.1)$$

σ zde značí pevnost nehomogenního materiálu (s póry), σ_0 pevnost materiálu bez pórů, B je konstanta a P podíl pórů vyjádřený v procentech. Pevnost závisí také na velikosti pórů a jejich poloze (typu namáhání) [39].

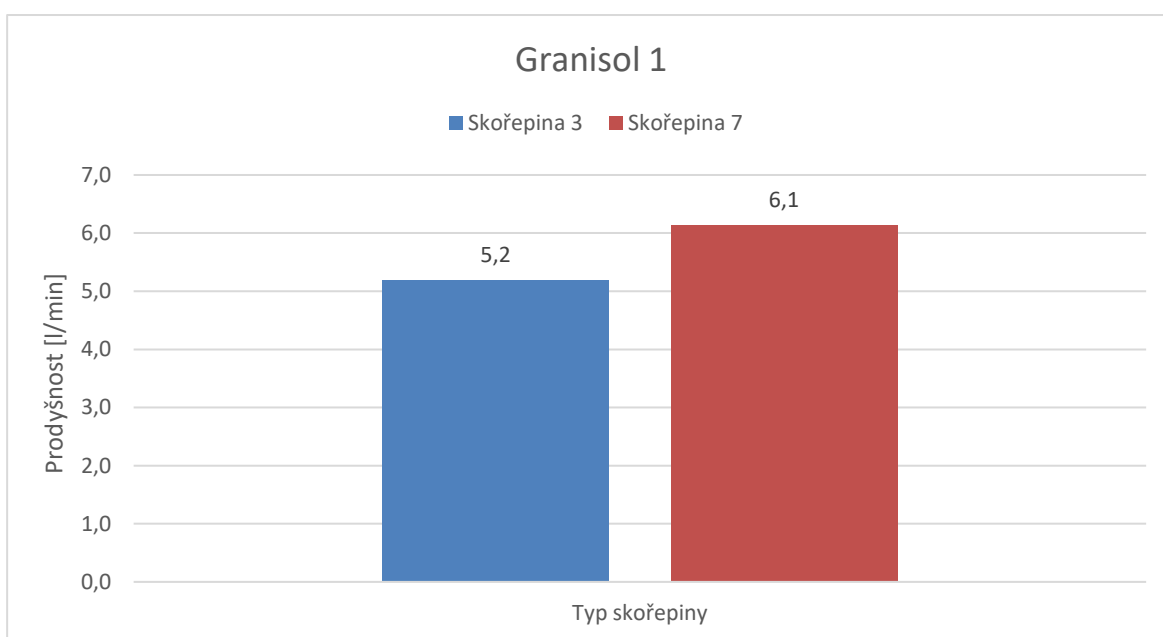
3.2.3 Měření prodyšnosti

V důsledku problémů vzniklých při výrobě vzorků (praskání skořepiny, nevypálení celého míčku) byly vyrobeny pouze 2 vzorky pro každou skořepinu. Provedené měření prodyšnosti (v celé etapě 1) má tedy pouze informativní charakter bez nároku na statistickou významnost. Nejsou tedy uvedeny ani hodnoty SD. Měření bylo prováděno při tlaku 300 mb.

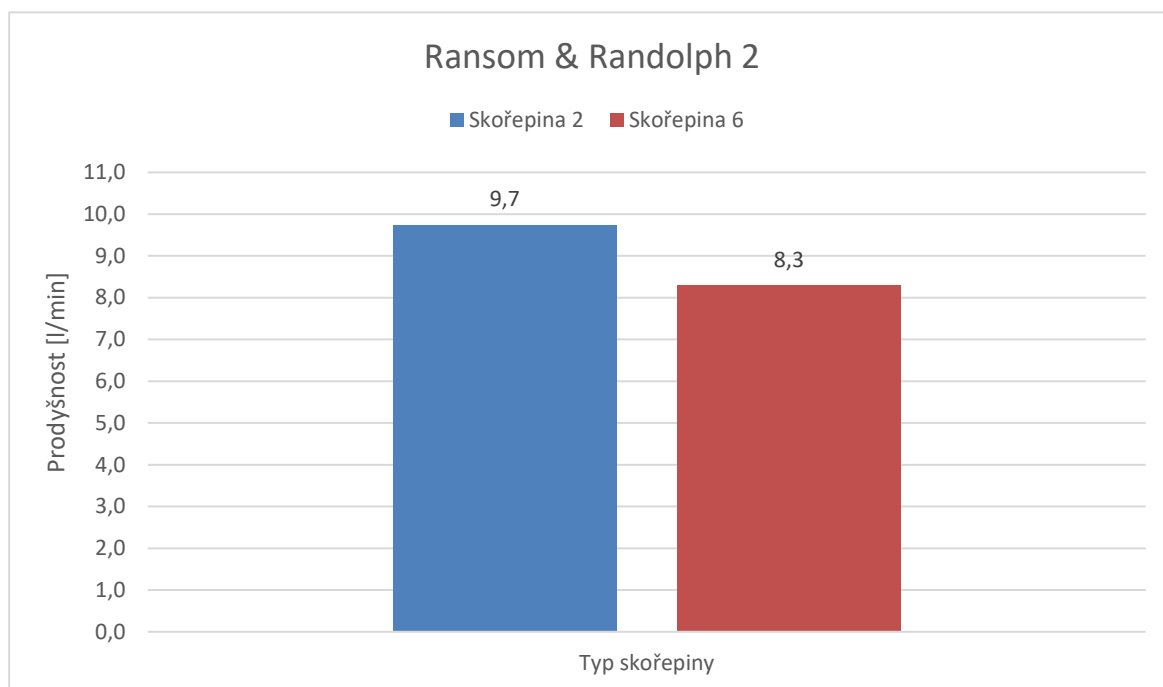


Obr. 28 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph 1 (viz Tab. 3)

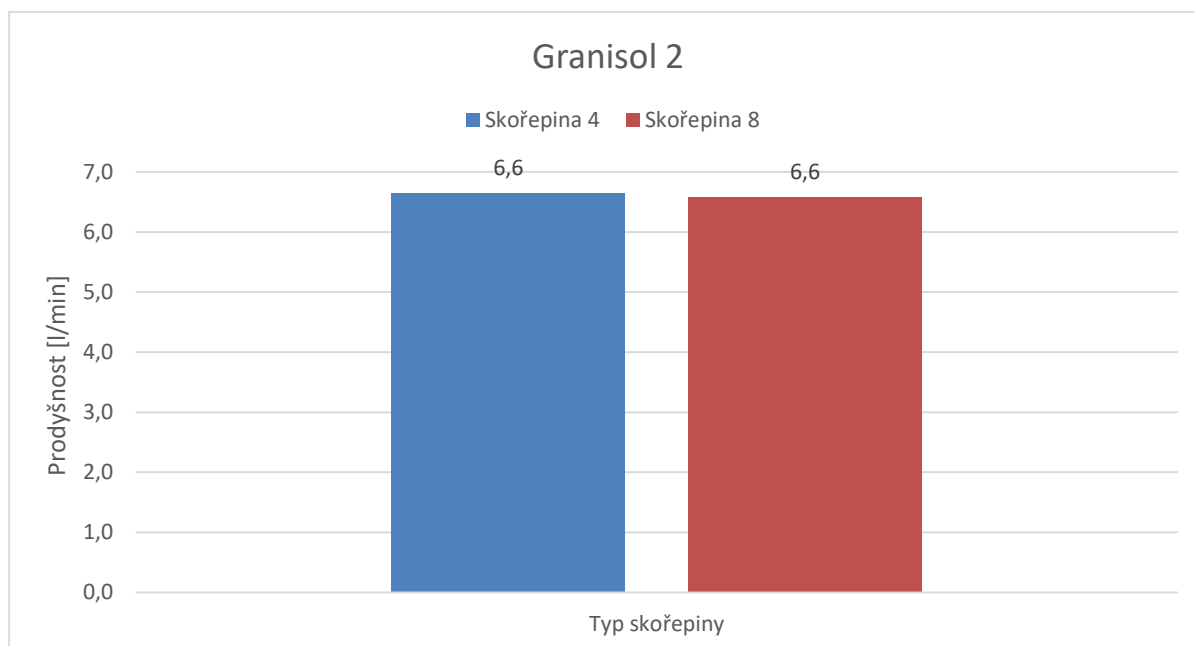
Větší počet obalů zřejmě způsobil velmi nízkou prodyšnost skořepiny A.



Obr. 29 – Prodyšnost skořepiny Granisol 1 (viz Tab. 4)



Obr. 30 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph 2 (viz Tab. 5)



Obr. 31 – Prodyšnost skořepiny Granisol 2 (viz Tab. 6)

Největší prodyšnost byla očekávána u skořepin Ransom & Randolph 1 a Granisol 1, a to v důsledku použití posypu o vyšší zrnitosti u krycích obalů. Tento předpoklad se však nepotvrdil. Nejvyšších hodnot dosahuje skořepina 2 a 6 (9,7, resp. 8,3 l/min), za použití břěčky Ransom & Randolph 2, kde bylo použito ostřívo o nižší zrnitosti 30/80. Skořepiny 3 a 7 (Granisol 1) dosáhly nejnižších prodyšností vůbec, skořepina (Ransom & Randolph 1, ručně, intenzivní sušení) dosáhla 3. nejvyšší hodnoty 6,8 l/min.

3.3 Původní složení skořepiny – ruční obalování pomocí břechky z robota

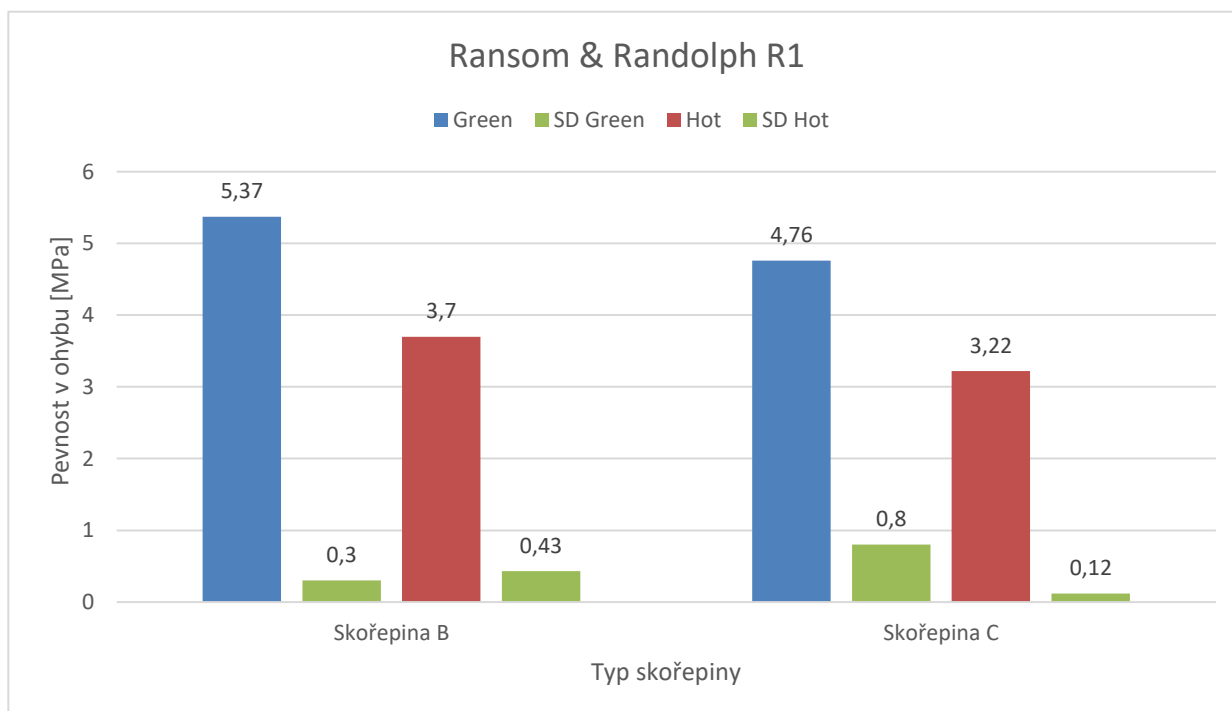
Tab. 7 – Složení skořepiny Ransom & Randolph R1

Skořepina	Ransom & Randolph R1	
Obal 1	Primecote + Mulgrain 60 325, Molochite 50/80, 29s	
Obal 2	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s	
Obal 3	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s	
Obal 4	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 200, Molochite 16/30, 14s	
Obal 5	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 200, Molochite 16/30, 14s	
Způsob obalování	robot	ručně
Označení	B	C
Sušení	linka	intenzivní
Kusů (stromků)	6 (3)	10 (5)

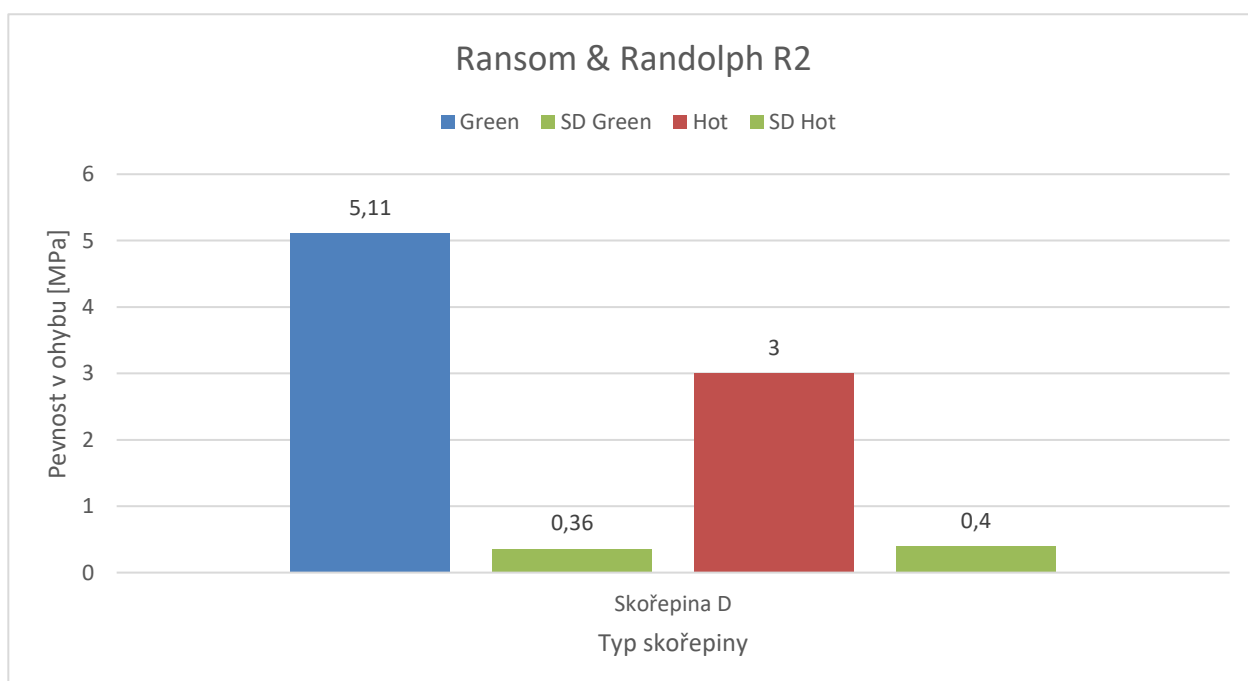
Tab. 8 – Složení skořepiny Ransom & Randolph R2

Skořepina	Ransom & Randolph R2	
Obal 1	Primecote + Mulgrain 60 325, Molochite 50/80, 29s	
Obal 2	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s	
Obal 3	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s	
Obal 4	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 200, Molochite 30/80, 14s	
Obal 5	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 200, Molochite 30/80, 14s	
Způsob obalování	ručně	
Označení	D	
Sušení	intenzivní	
Kusů (stromků)	10 (5)	

3.3.1 Měření pevnosti MOR



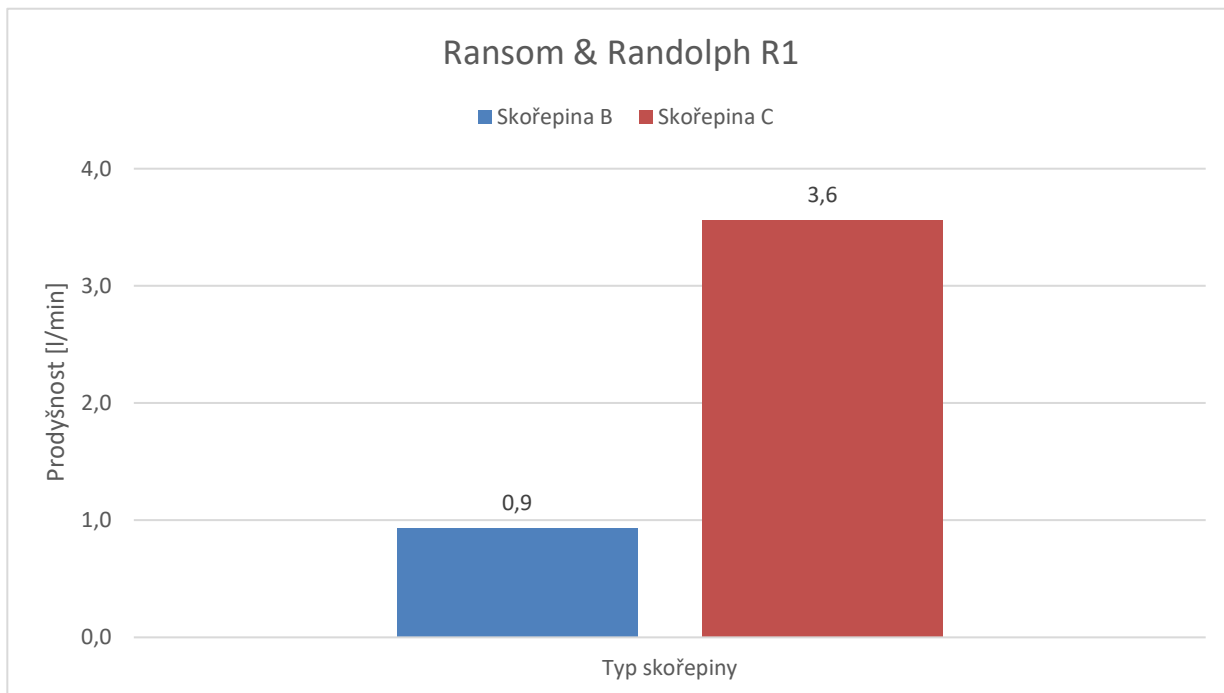
Obr. 32 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph R1 (viz Tab. 7)



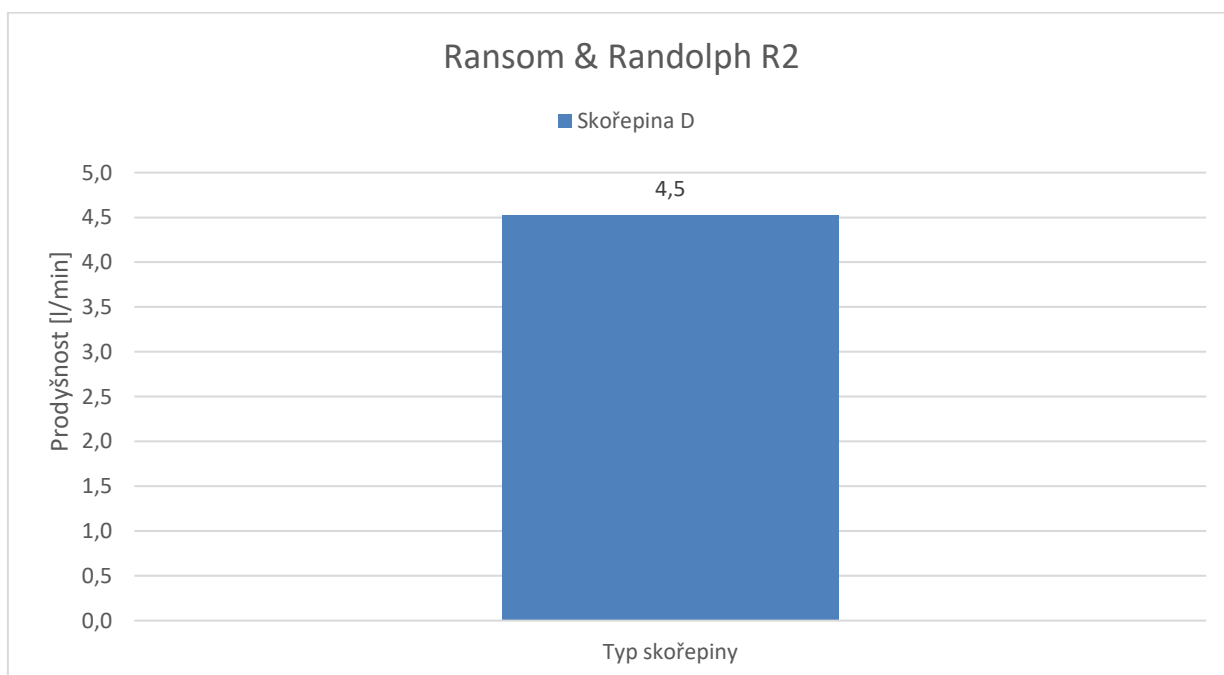
Obr. 33 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph R2 (viz Tab. 8)

Nejvyšší pevnosti zde dosahuje skořepina B obalovaná na robotu (za syrova i po vyžihání). Oproti analogické skořepině A má tato menší počet obalů (5).

3.3.2 Měření prodyšnosti



Obr. 34 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph R1 (viz Tab. 7)



Obr. 35 - Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph R2 (viz Tab. 8)

3.4 Vady odlitků a zmetkovitost

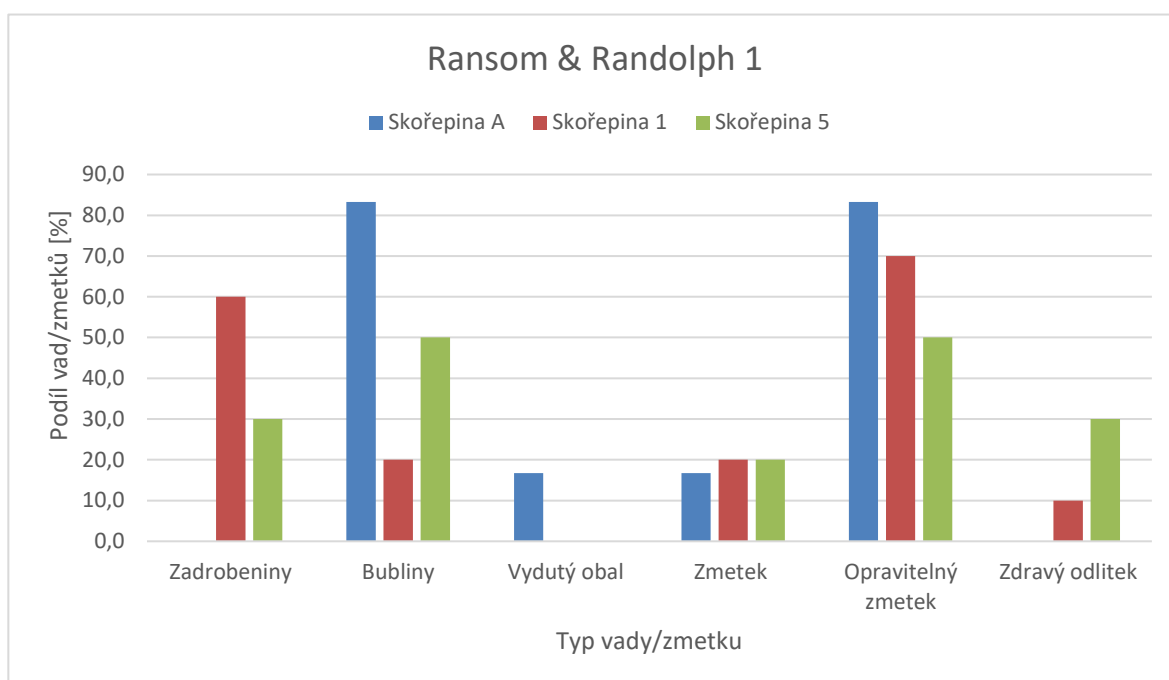
U odlitků se vyskytovaly 3 typy povrchových vad souvisejících s kvalitou skořepiny: bubliny, výronky doprovázené zadrobeninami a vzduť obalu, což způsobilo zkřivení stěny odlitku. Jako neopravitelné zmetky byly klasifikovány odlitky se zkřivenou stěnou a odlitky se zadrobeninami či bublinami, vyskytujícími se na „kříži“ (oprava byla zakázána odběratelem). Kontrola odlitků byla provedena vizuálně. Pod označením „podíl vad/zmetků“ v následujícím vyhodnocení i v analogických vyhodnoceních v dalších kapitolách se vždy rozumí *podíl odlitků obsahujících tyto vady/podíl zmetků* bez ohledu na množství těchto vad na jednotlivých odlitcích.



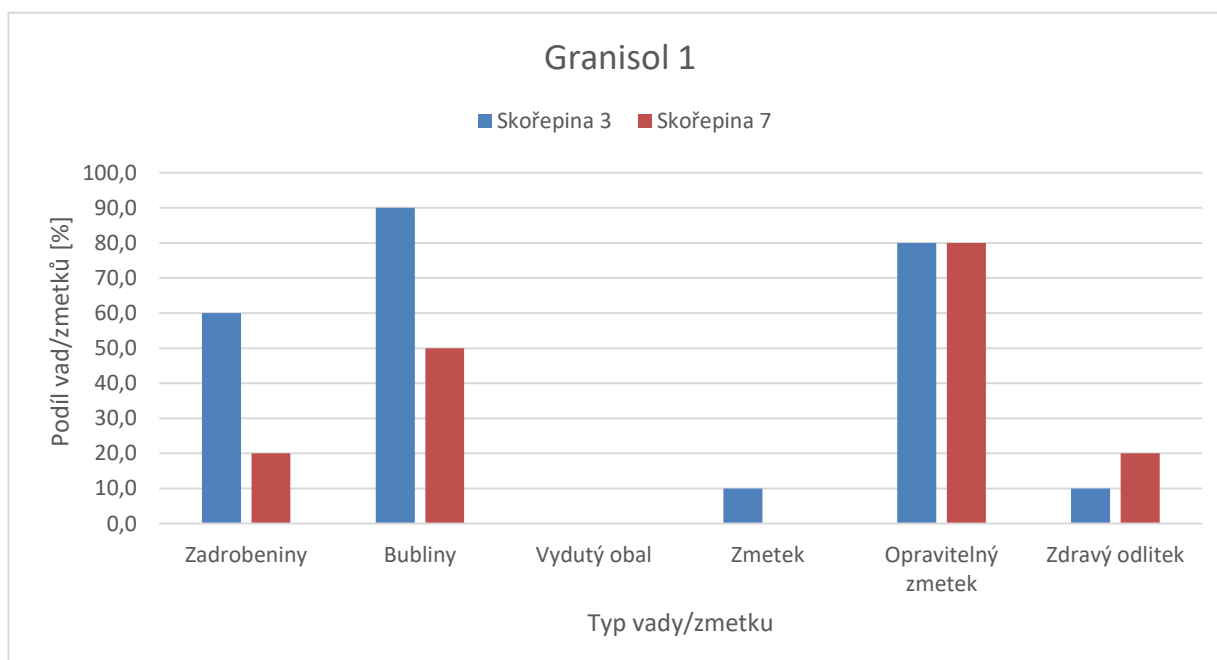
Obr. 36 – Zadrobenina na kříži odlitku



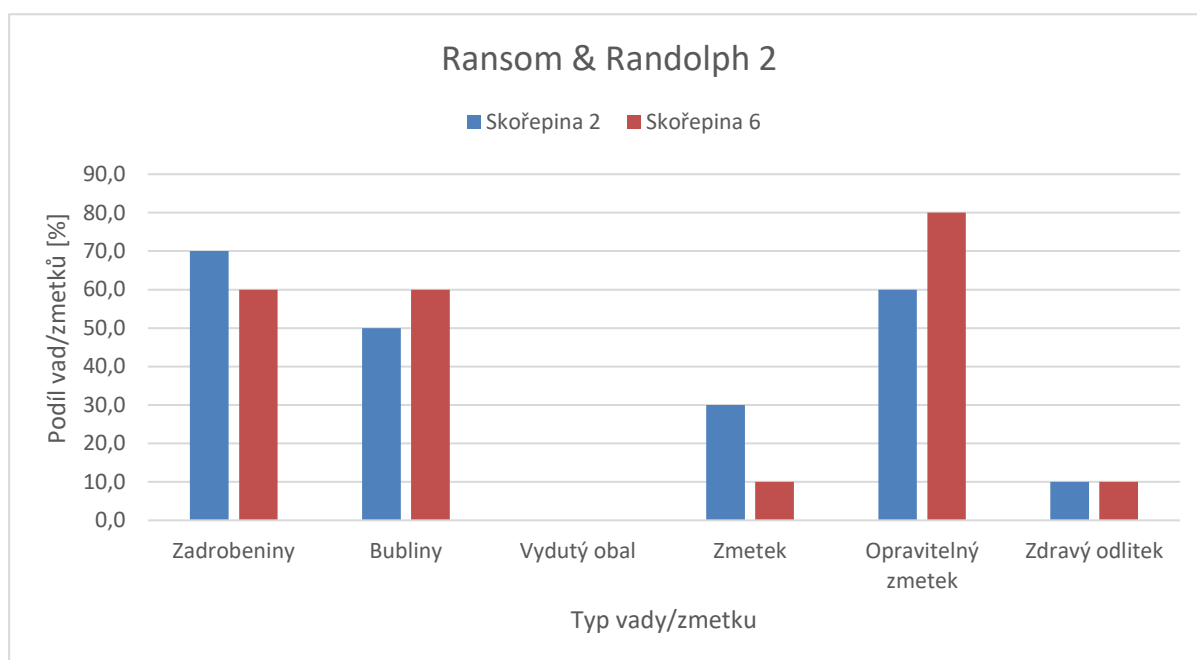
Obr. 37 – Odlitek s viditelnými bublinami



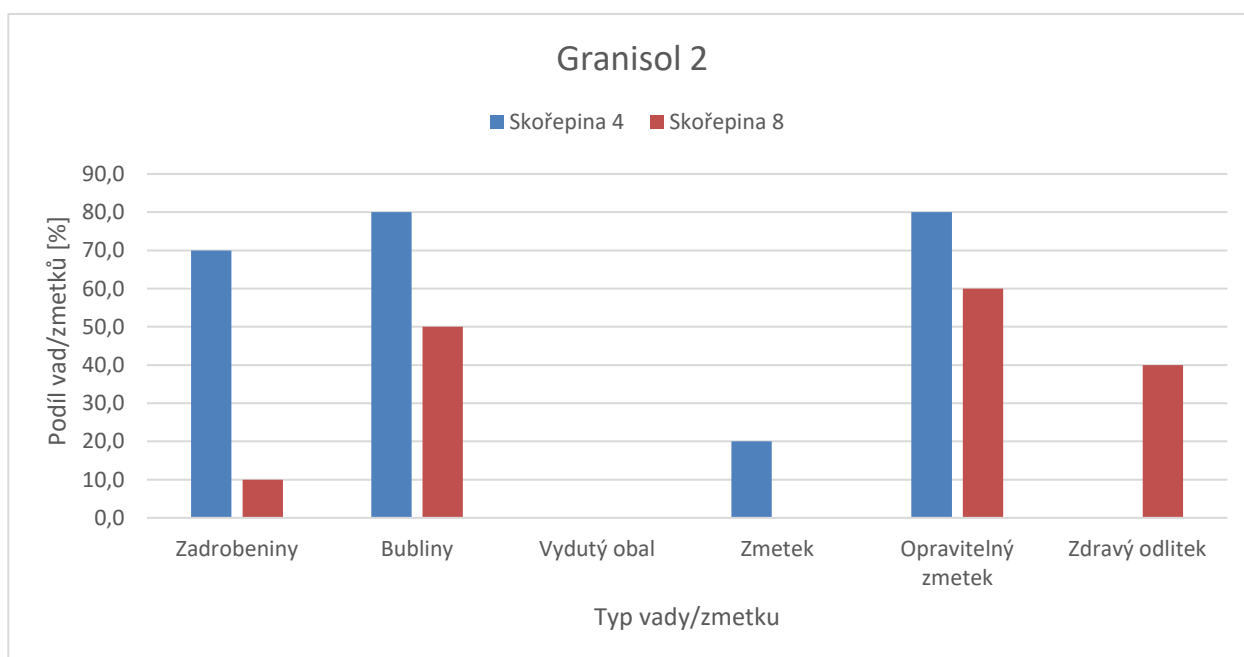
Obr. 38 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph 1 (viz Tab. 3)



Obr. 39 – Podíl vad/zmetků skořepiny Granisol 1 (viz Tab. 4)



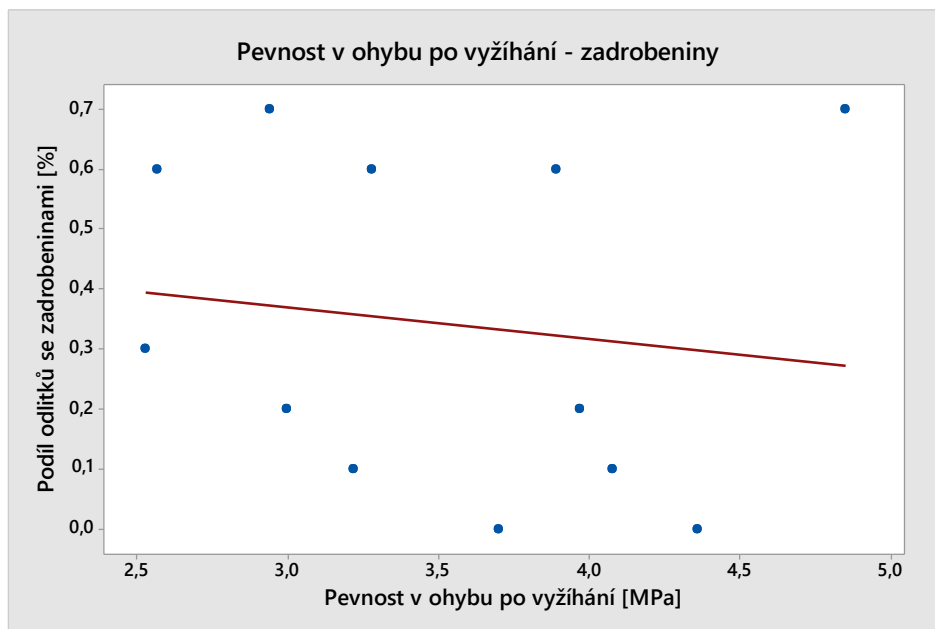
Obr. 40 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph 2 (viz Tab. 5)



Obr. 41 – Podíl vad/zmetků skořepiny Granisol 2 (viz Tab. 6)

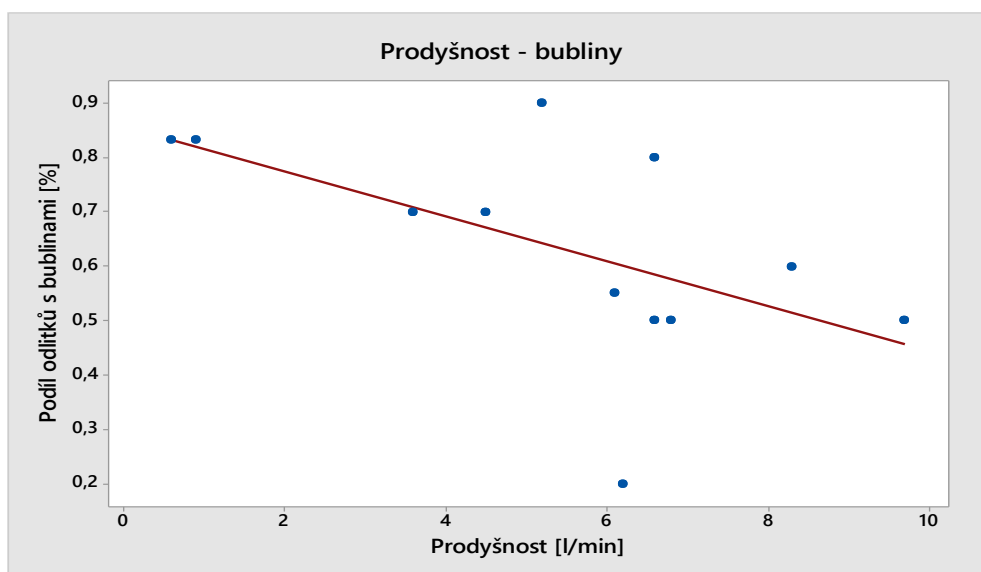
Nejmenší počet zadrobenin (0 %, resp. 10 %) se vyskytuje u skořepin A a 8, které vykazaly vysokou pevnost po vyžhání (4,36 resp. 4,08 MPa). Podíl odlitků se zadrobeninami u skořepiny 4 s nejvyšší pevností 4,85 MPa byl ale 70 %. Stejný podíl se vyskytoval také u skořepiny 2, která měla 2. nejmenší hodnotu pevnosti za syrova (3,53 MPa)

a 3. nejmenší hodnotu pevnosti po vyžihání (2,94 MPa). Pearsonův korelační test ukázal slabou negativní korelaci ($r=-0,137$) hodnoty pevnosti po vyžihání a podílu odlitků se zadrobeninami (zahrnuta i data skořepin Ransom & Randolph R1 a R2)

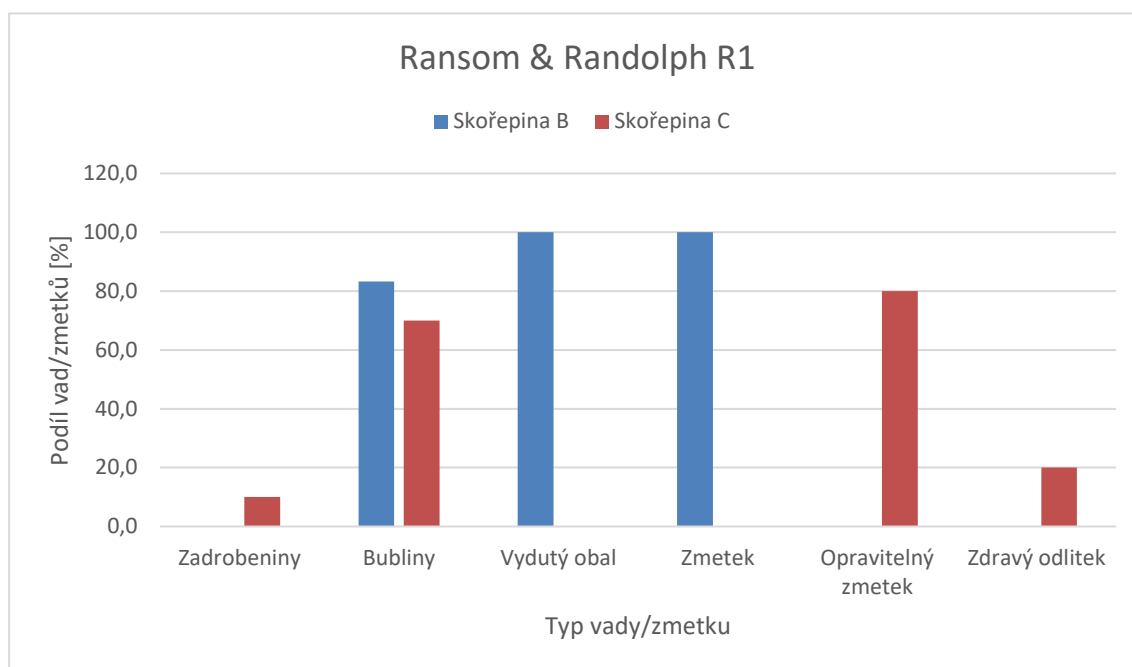


Obr. 42 – Regresní přímka hodnoty pevnosti a podílu odlitků se zadrobeninami

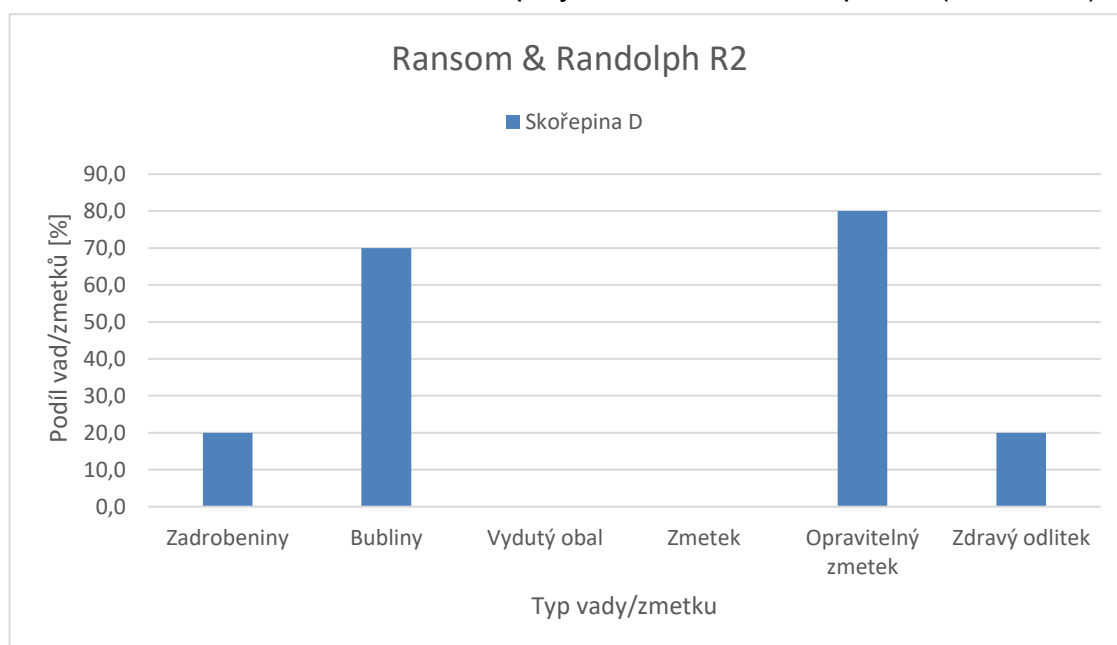
Množství odlitků s bublinami bylo zřejmě ovlivněno prodyšností skořepin. Až 83 % odlitků skořepiny A s velmi nízkou prodyšností 0,6 l/min obsahovalo bubliny. Oproti tomu skořepiny 2 s vysokou prodyšností 9,7 obsahovala 50 % bublin – nejmenší hodnotu skořepin etapy 1. Stejných hodnot dosáhly i skořepiny 7 a 8. Pearsonův korelační test ukázal střední negativní korelaci ($r=-0,560$) hodnoty prodyšnosti a podílu odlitků s bublinami (zahrnuta i data skořepin Ransom & Randolph R1 a R2). Výsledky tak odpovídají předpokladu, že s vyšší prodyšností klesá množství bublin.



Obr. 43 – Regresní přímka hodnoty prodyšnosti a podílu odlitků s bublinami



Obr. 44 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph R1 (viz Tab. 7)



Obr. 45 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph R2 (viz Tab. 8)

Pozoruhodné výsledky vykazala skořepina B. Odlitky z této skořepiny měly ve 100 % případů vydutý obal, a byly tedy vyřazeny jako neopravitelné zmetky. Na těchto odlitcích se ovšem vůbec nevyskytovaly zadrobeniny.

4 ETAPA 2

4.1 Modifikace plniva na Molochite 120

V této části byla provedena modifikace plniva v krycích obalech 4-5 (4-7) z Molochite 200 na Molochite 120. Tato změna měla zajistit lepší prodyšnost, především na robotické lince, která v etapě 1 vykazovala velmi nízké hodnoty prodyšnosti.

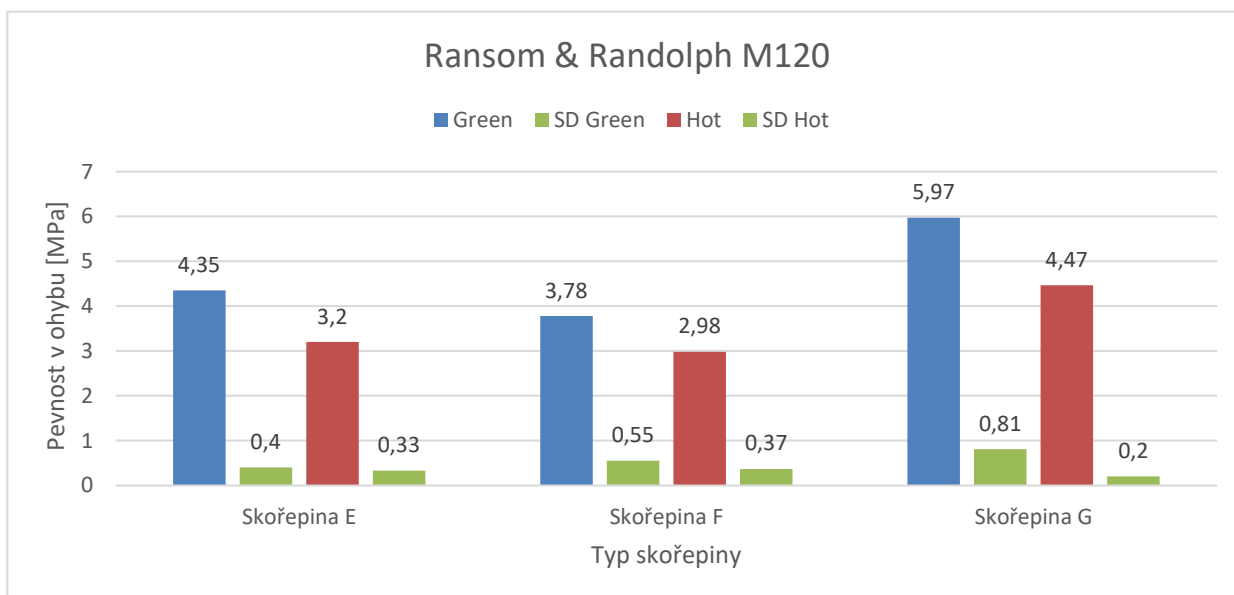
Tab. 9 – Složení skořepiny Ransom & Randolph M120

Skořepina	Ransom & Randolph M120		
Obal 1	Primecote + Mulgrain 60 325, Molochite 50/80, 29s		
Obal 2	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s		
Obal 3	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s		
Obal 4	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 120, Molochite 16/30, 14s		
Obal 5	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 120, Molochite 16/30, 14s		
Způsob obalování	robot (7 vrstev)	ručně	
Označení	G	E	F
Sušení	linka	mírné – obal 1, 2 a 3	intenzivní
Kusů (stromků)	12 (6)	10 (5)	10 (5)

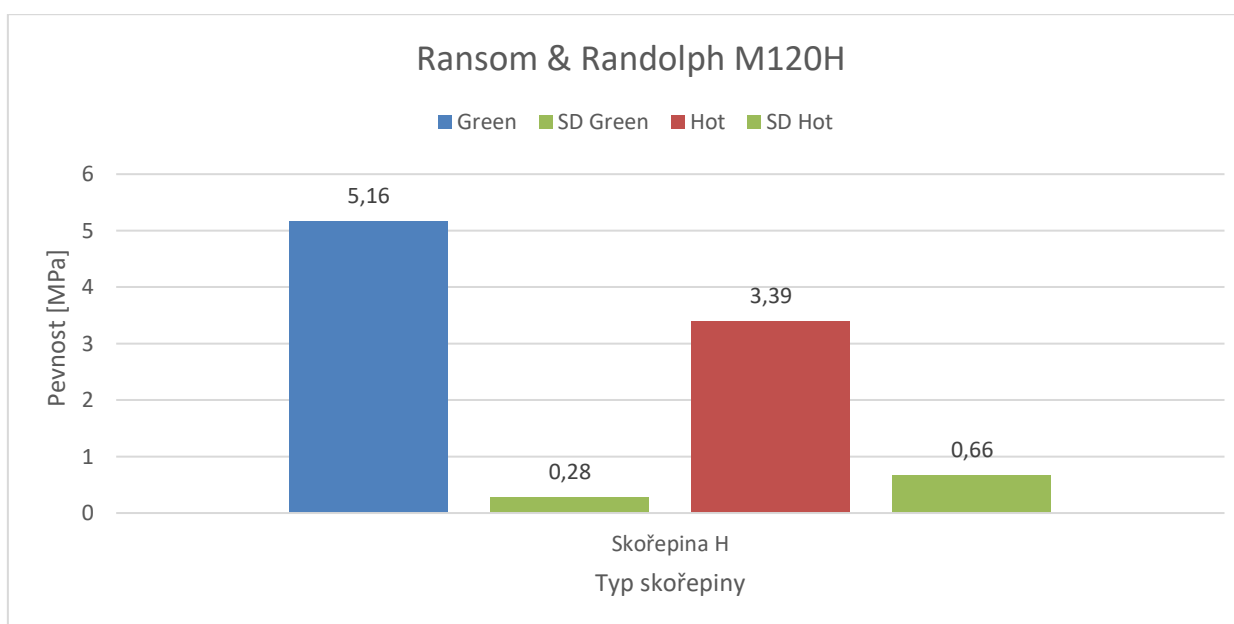
Tab. 10 – Složení skořepiny Ransom & randolph M120H

Skořepina	Ransom & Randolph M120H	
Obal 1	Primecote + Mulgrain 60 325, Molochite 50/80, 29s	
Obal 2	MatriXsol 30 + MXC Excel concentrate + Molochite 200, Molochite 30/80, 8s	
Obal 3	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 120, Molochite 16/30, 14s	
Obal 4	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 120, Molochite 16/30, 14s	
Obal 5	MatriXsol 30 + MXC Excel X2 blend + Molochite 120, Molochite 16/30, 14s	
Způsob obalování	robot	
Označení	H	
Sušení	linka	
Kusů (stromků)	12 (6)	

4.1.1 Měření pevnosti MOR



Obr. 46 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph M120 (viz Tab. 9)

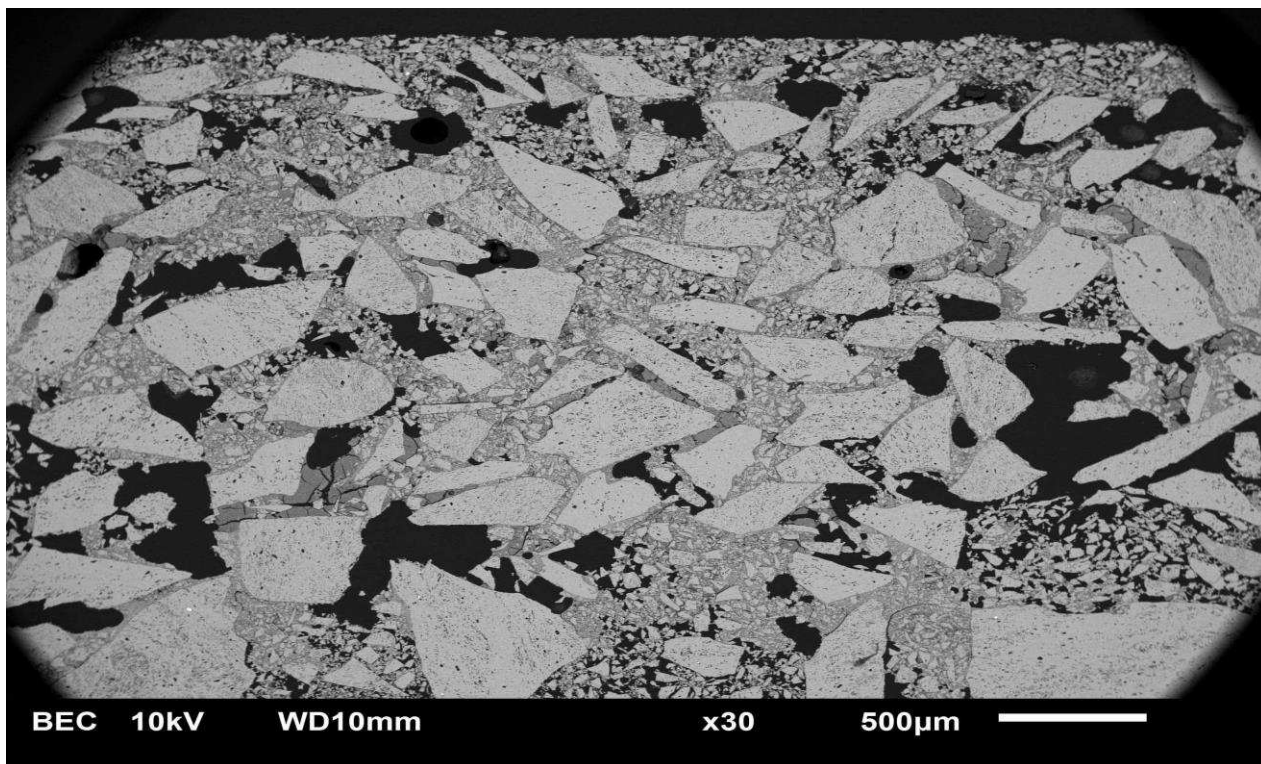


Obr. 47 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph M120H (viz Tab. 10)

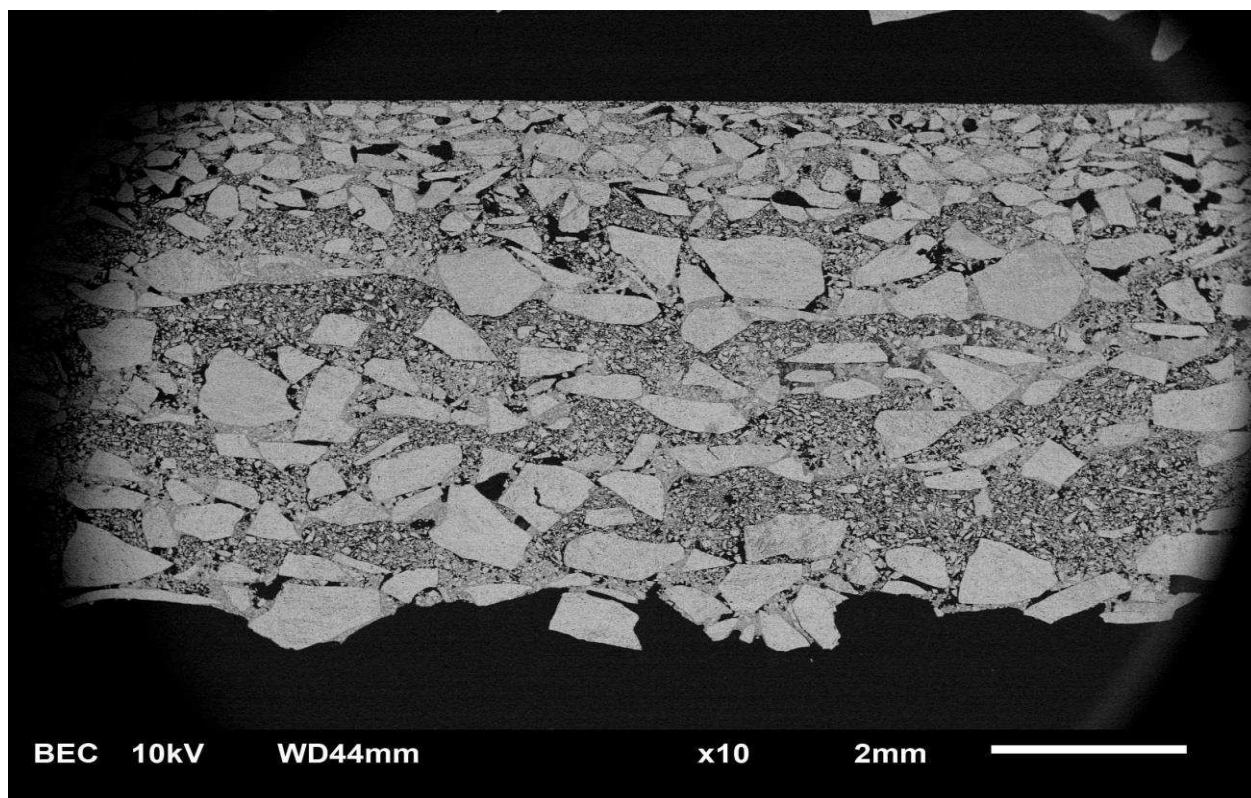
Nejvyšší pevnosti po vyžihání i za syrova zde dosahuje skořepina G, obalovaná na robotu. Tato skutečnost zřejmě souvisí se zvýšeným počtem vrstev. Analogická skořepina A také dosahovala vysoké pevnosti (3. nejvyšší v etapě 1).

4.1.2 SEM analýza

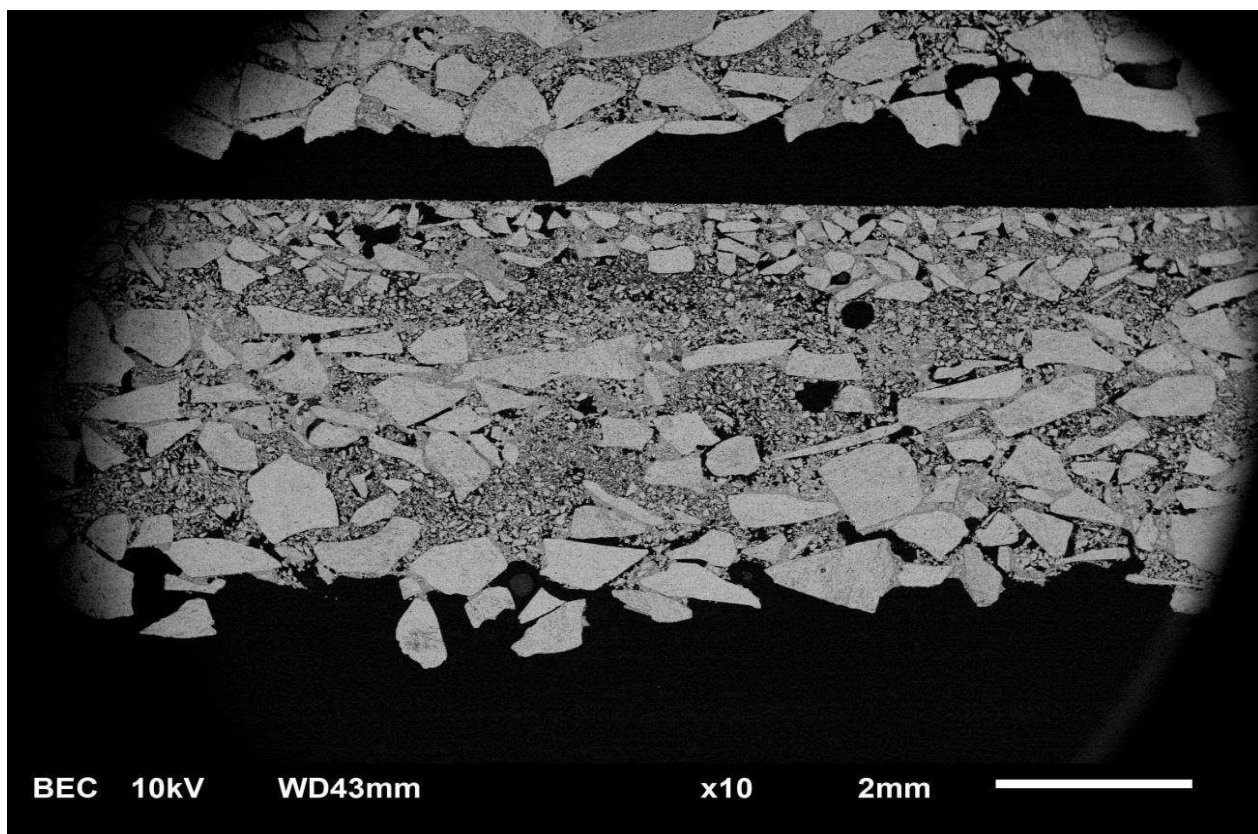
V této části byly zhotoveny výbrusy skořepin F, G a H.



Obr. 48 – Výbrus skořepiny F green



Obr. 49 – Výbrus skořepiny G green

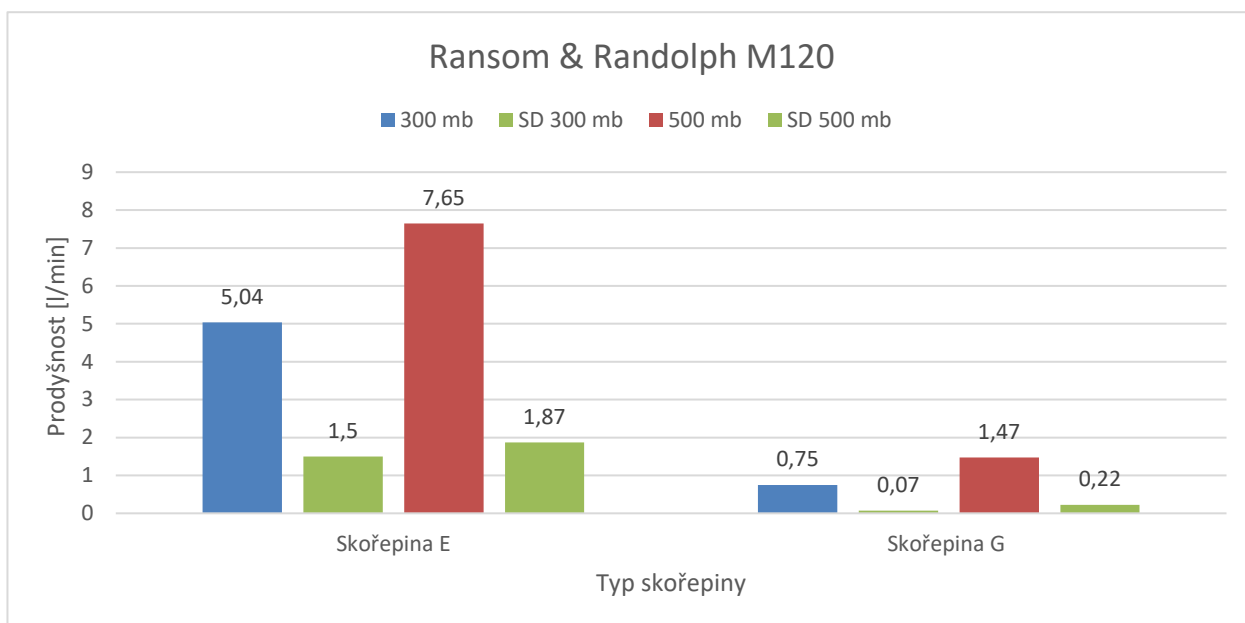


Obr. 50 – Výbrus skořepiny H green

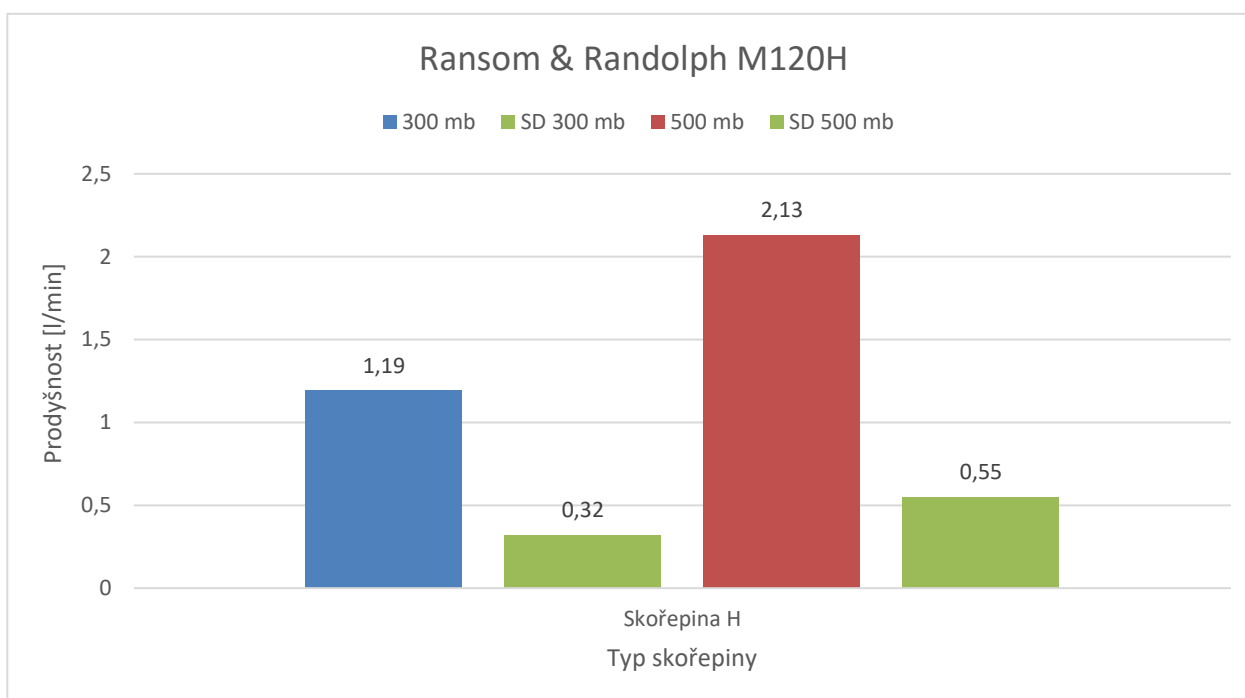
Skořepiny F je více porézní než skořepiny G a H. Výrazně menší porezita skořepin G a H je v souladu s jejich nízkou prodyšností (viz 4.1.3)

4.1.3 Měření prodyšnosti

Prodyšnost ve etapě 2 byla měřena pro tlak 300 i 500 mb. Výsledky pro skořepinu F nebudou uvedeny; v důsledku prasknutí skořepiny byly k dispozici pouze 2 vzorky, které vykazovaly velmi rozdílné hodnoty prodyšnosti.



Obr. 51 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph M120 (viz Tab. 9)

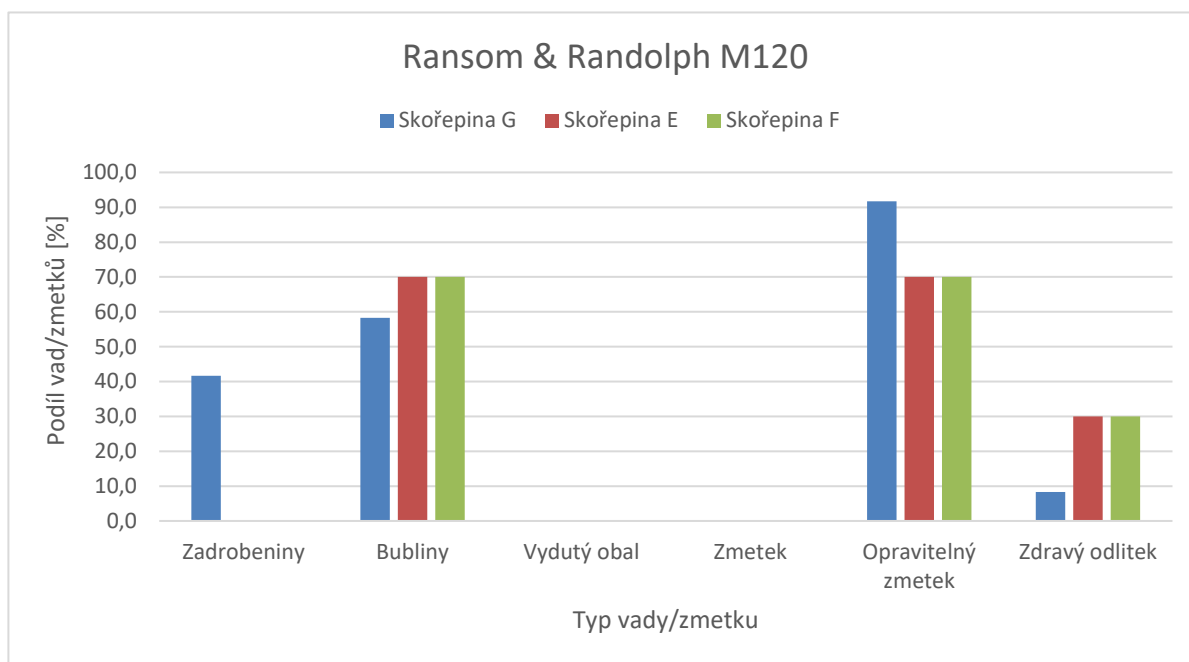


Obr. 52 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph M120H (viz Tab. 10)

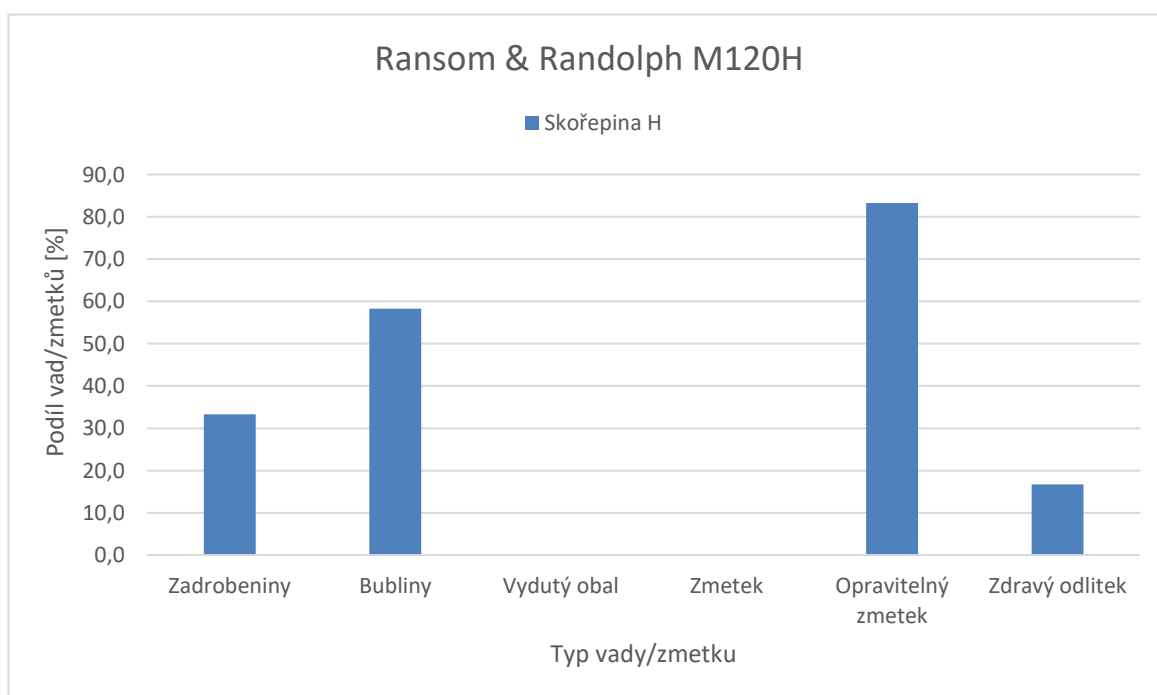
Podle očekávání prodyšnost vzrůstá s vyšším tlakem. Skořepina G, analogická skořepině A z etapy 1, vykazovala zvýšení prodyšnosti o 0,15 l/min (z 0,6 na 0,75 l/min).

Skořepina H dosáhla prodyšnosti 1,19, resp. 2,13 l/min, tato hodnota je nejvyšší ze všech skořepin, vyrobených roboticky. Skořepina E oproti analogické skořepině 1 dosáhla nižší prodyšnosti 5,04 l/min.

4.1.4 Vady odlitků a zmetkovitost



Obr. 53 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph M120 (viz Tab. 9)



Obr. 54 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph M120H (viz Tab. 10)

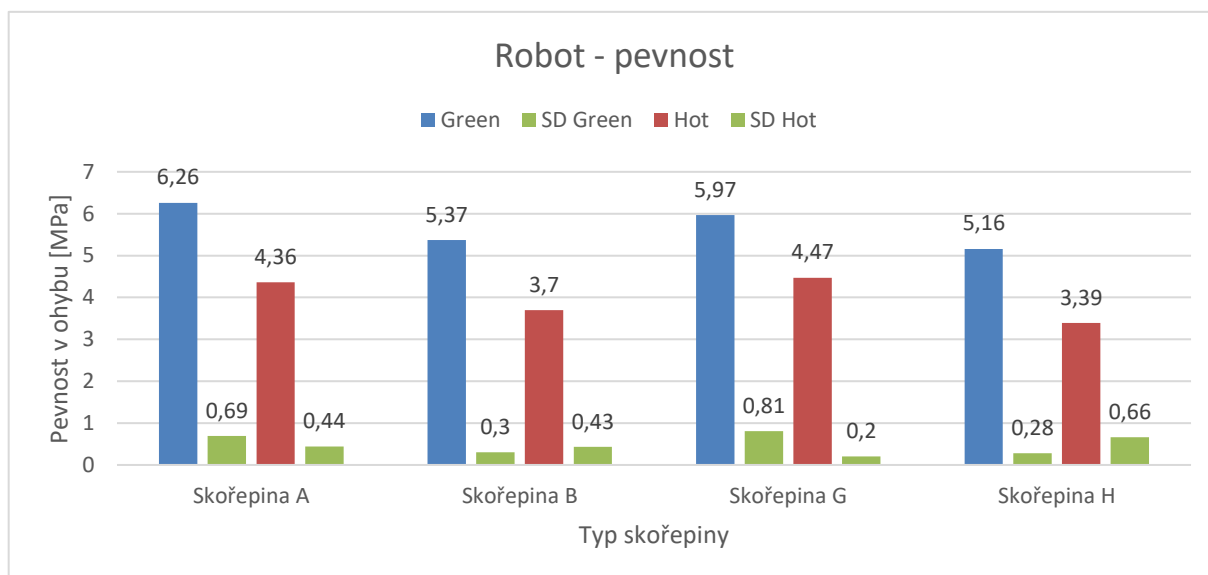
Na rozdíl od odlitků z etapy 1 se ani v jednom případě nevyskytl neopravitelný zmetek. U skořepin E a F se nevyskytovaly zadrobeniny. Množství odlitků s bublinami se pohybovalo od 58,3 do 70 %. Z odlitků skořepiny G bylo pouze 8,3 % zdravých, všechny ostatní však byly opravitelné.

5 DISKUZE

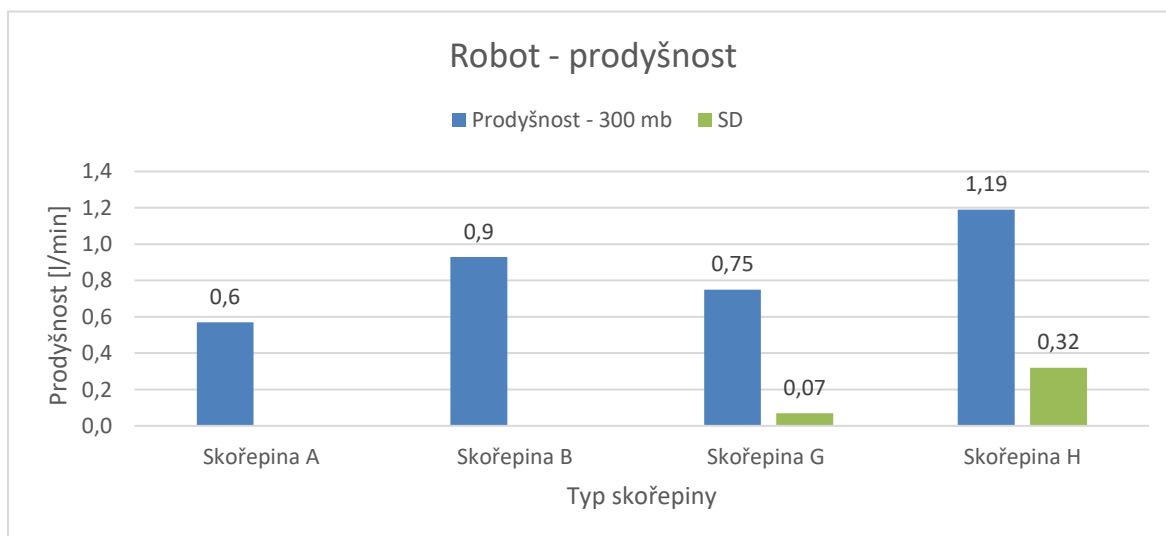
Výsledky lze zhodnotit z několika hledisek. Zde bude vyloženo srovnání výsledků z pohledu typu výroby (roboticky, ručně, modifikace plniva atd.), typu sušení, zmetkovitosti.

5.1 Robotické obalování

Nejvyšší pevnosti za syrova z této skupiny dosahovala skořepina A, následovaná skořepinou B, která disponovala nejvyšší pevností po vyžihání. Prodyšnost byla u roboticky obalovaných skořepin velmi nízká, obzvláště pak u skořepin A a G se 7 vrstvami obalů. Přesto se však prodyšnost zvýšila po modifikaci plniva na Molochite 120. U skořepin G a H se nevyskytl žádný neopravitelný zmetek, odlitky ze série B byly naopak všechny vyhozeny kvůli zkřivení stěny odlitku.



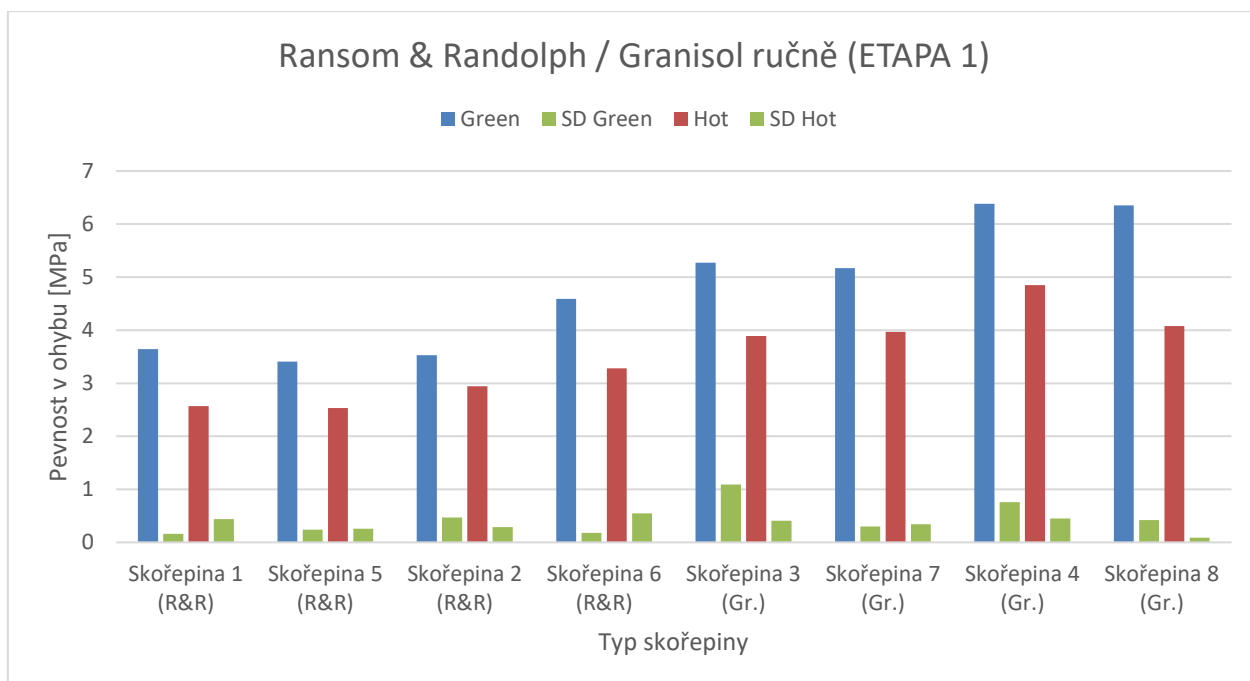
Obr. 55 – Pevnost v ohybu – robotické obalování



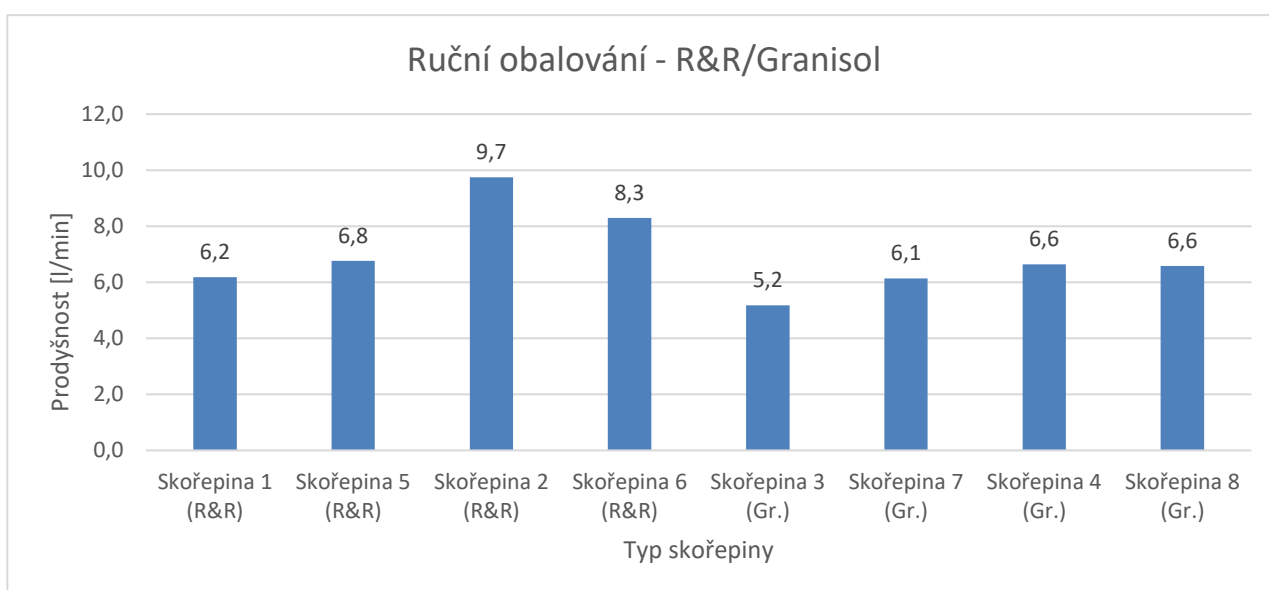
Obr. 56 – Prodyšnost – robotické obalování

5.2 Ruční obalování – Ransom & Randolph a Granisol (ETAPA 1)

Nejvyšší pevnosti vykazovaly skořepiny 4 a 8 (Granisol). Tyto skořepiny dosáhly vůbec nejvyšších pevností ze všech zkoušených skořepin. Všechny 4 skořepiny Granisol disponovaly vyššími pevnostmi než skořepiny Ransom & Randolph, zato však všechny měly nižší prodyšnost. Ta byla nejvyšší u skořepiny 5 (nejvyšší ze všech skořepin). To se projevilo na výskytu bublin, kde lepších výsledků dosahovaly skořepiny Ransom & Randolph (18 odlitků s bublinami u R&R oproti 27 odlitkům u Granisolu). Všechny skořepiny vyrobené ručně měly výrazně vyšší prodyšnost než skořepiny vyrobené roboticky.



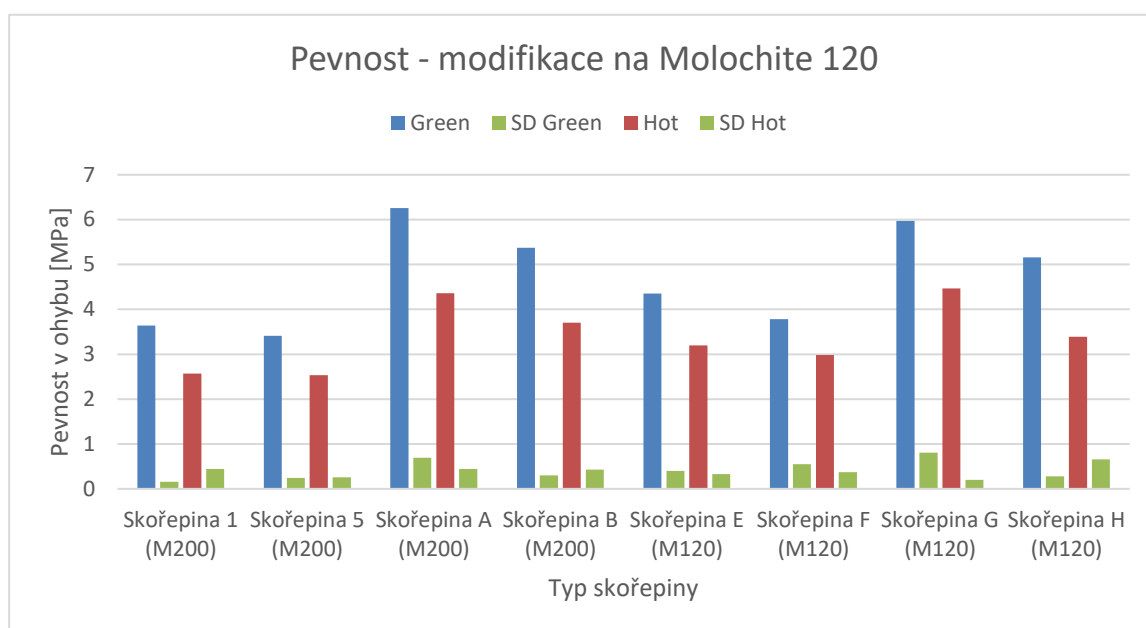
Obr. 57 – Pevnost v ohybu skořepin vyrobených ručně (ETAPA 1)



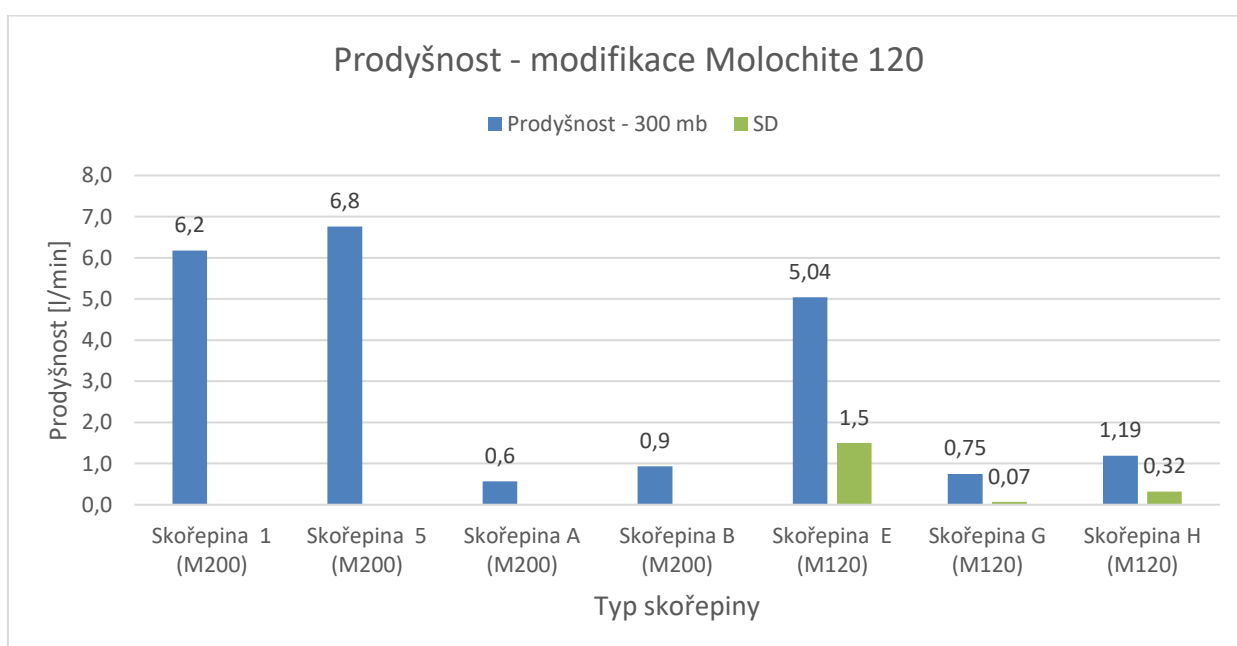
Obr. 58 – Prodyšnost skořepin vyrobených ručně (ETAPA 1)

5.3 Modifikace plniva na Molochite 120 (ETAPA 2)

U skořepin obalovaných ručně (E, F) byl zaznamenán nárůst pevnosti za syrova i po vyžihání. U roboticky obalovaných skořepin naopak lehce poklesla pevnost za syrova, skořepina G avšak vykazala nejvyšší pevnost po vyžihání z tohoto srovnání. V případě prodyšnosti vidíme jednoznačný rozdíl mezi skořepinami vyrobenými ručně a roboticky. Po modifikaci plniva na Molochite 120 byla zlepšena prodyšnost u skořepin z robotu, u ručního obalování naopak poklesla. Z hlediska počtu zmetků vychází nejlépe skořepiny E, F, G a H (po modifikaci), u kterých nebyl zaznamenán ani jeden zmetkový odlitek.



Obr. 59 – Pevnost před a po modifikaci plniva



Obr. 60 – Prodyšnost před a po modifikaci plniva

5.4 Návrhy pro další vývoj skořepiny

Po celkovém zhodnocení experimentu lze vysledovat několik trendů, souvisejících s kvalitou skořepiny a odlitku:

A) **Robotické obalování zapříčiňuje nižší prodyšnost** – podstata problému zřejmě tkví v rozdílném způsobu aplikace posypu, kde u robotického obalování je nanášeno sprchově a u ručního pomocí fluidního lože. Předpokládaným důvodem je vliv kinetické energie dopadajícího ostřiva. Podle G. Dooleyho také sprchový posyp vytváří menší vrstvu, což může být rizikové především v oblasti ostrých rohů a hran. Zásadní vliv má ovšem také primární břecha, která má vždy nejvyšší viskozitu. Dalším směrem při řešení tohoto problému by tedy mohlo být následující [40]:

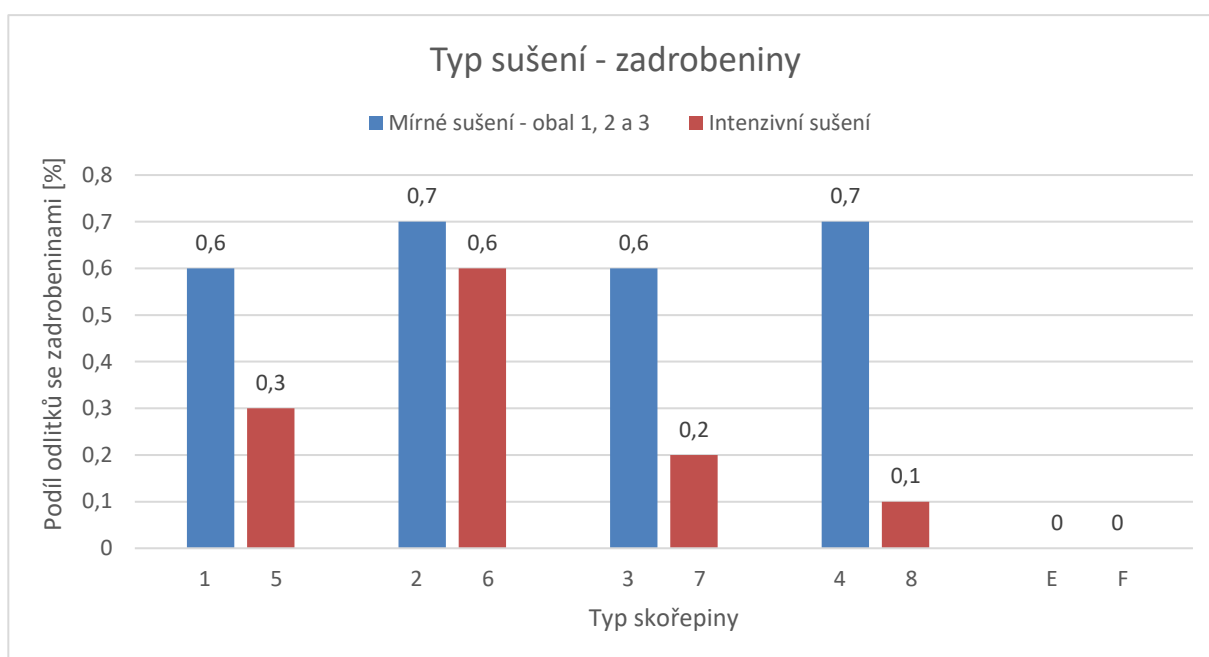
- snížit výšku skořepiny pod sprchovým zařízením, aby tak byla snížena kinetická energie dopadajícího ostřiva
- snížit viskozitu primární břechky
- případně zvýšit zrnitost posypu u některých krycích obalů na 8/16 mesh

B) **Vyšší viskozita krycích břechek zvyšuje pevnost skořepiny** – nejvyšších pevností (nad 6 MPa) dosáhly pouze 3 typy skořepin: A, 4 a 8. Skořepina A obsahovala 7 vrstev obalu. Krycí břecha u druhého a třetího obalu skořepin 4 a 8 (viz Tab. 6) disponovaly viskozitou 13 a 14 s. U všech ostatních skořepin měly viskozity těchto břechek hodnotu 8 s. Jak ale bude vyloženo v následující kapitole, nelze vyvodit jednoznačný vztah mezi pevností skořepiny a podílem odlitků se zdrobeninami.

C) **Vyšší prodyšnost zapříčiňuje menší množství bublin** – po aktualizaci o výsledky z etapy 2 ukazuje Pearsonův korelační test střední negativní korelaci ($r=-0,406$). Kauzální vztah mezi těmito dvěma veličinami nebyl blíže zkoumán, výsledky ovšem odpovídají teoretickým předpokladům, tedy že s vyšší prodyšností klesá množství bublin. Úpravy pro zvýšení prodyšnosti byly navrženy v bodě A.

5.4.1 Otázka souvislosti typu sušení a podílu odlitků se zadrobeninami

Po aktualizaci o výsledky z etapy 2 ukazuje Pearsonův korelační test oproti očekáváním velmi slabou *pozitivní* korelaci ($r=0,025$) hodnot pevnosti v ohybu a množství odlitků se zadrobeninami. Nelze tedy předpokládat jednoznačný vztah mezi těmito veličinami. U naprosté většiny odlitků se zadrobeninami se však objevovaly nepravidelné výronky v koutech odlitku (viz Obr. 21), se kterými vznik zadrobenin často souvisí (viz bod G, kapitola 2.6). Příčinou samotného výronku bývá často nedostatečné proschnutí skořepiny. Nyní lze tedy srovnat ručně vyrobené skořepiny z hlediska intenzity sušení a podílu odlitků se zadrobeninami.



Obr. 61 – Vztah typu sušení a podílu odlitků se zadrobeninami

Jak lze vidět, po intenzivním sušení byl podíl odlitků se zadrobeninami vždy nižší než po sušení mírném, v případě skořepin 4 a 8 tento rozdíl činil až 60 %. Dá se tedy předpokládat příčinný vztah mezi těmito dvěma veličinami. Výskyt výronků a zadrobenin však závisí i na jiných faktorech. Jako prevenci vzniku těchto vad lze tedy navrhnout:

- upřednostnit intenzivní sušení u odlitků s ostrými hranami a složitými tvary
- zabezpečit důkladné nanesení primárního obalu
- zvýšit pevnost skořepiny v rozích a koutech pomocí optimálního množství vláknitých přísad (viz kapitola 2.1.3)
- zajistit dostatečnou dobu nanášení ostřiva při sprchovém posypu tak, aby došlo k vytvoření dostatečné vrstvy i v rozích a na hranách [39]

ZÁVĚR

V rámci této práce bylo vyzkoušeno celkem 16 druhů skořepin dle typu obalování a sušení, vycházejících z 6 různých receptur obalů. V průběhu experimentu byly sledovány souvislosti mezi:

- robotickým obalováním a dosaženou prodyšností
- hodnotou viskozity břečky a pevností skořepiny
- hodnotou prodyšnosti a množstvím odlitků s bublinami
- typem sušení a množstvím odlitků se zadrobeninami

Předpokládaná souvislost mezi hodnotou pevnosti a množstvím odlitků se zadrobeninami naopak nebyla nalezena. Byla také potvrzena účinnost změny plniva z Molochite 200 na Molochite 120, a to především zvýšením prodyšnosti roboticky vyráběných skořepin G a H. Tato změna také pravděpodobně byla příčinou naprosté absence zadrobenin u ručně vyráběných skořepin E a F (hrubší plnivo prosychá snadněji a rychleji než předešlé jemnější). U těchto skořepin však nebylo dosaženo vyšší prodyšnosti, což se projevilo na vyšší podílu odlitků s bublinami než u analogických skořepin 1 a 5.

Nově používanou skořepinou je tedy typ Ransom & Randolph M120 a Ransom & Randolph M120H (viz Tab. 9 a Tab. 10). U robotické linky byly navrženy změny vedoucí k vyšší prodyšnosti skořepiny. U ručně vyráběných skořepin byla navržena úprava režimu sušení. Na rozdíl od ručně vyrobené skořepiny u robotické linky nelze poukázat na vztah mezi typem sušení a množstvím zadrobenin. Program robotické linky totiž neumožňuje přímé definování délky sušení uživatelem. Po aplikaci výše uvedených návrhů lze očekávat snížení počtu bublin a zadrobenin.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Členové sdružení. *Sdružení přesného lití* [online]. 2012 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <http://www.spl-cica.cz/clenove.php>
- [2] HORÁČEK, Milan. *Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. 1. Brno, 2009 [cit. 2017-12-14]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>
- [3] Výroba odlitků. *Výroba forem a odlitků - MESIT Foundry, a.s.* [online]. 2018, 2018 [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <https://www.mesitfoundry.cz/vyroba-odlitku>
- [4] BEELEY, Peter R. *Investment Casting*. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 09-017-1666-9.
- [5] BEELEY, Peter R. *Foundry technology*. 2nd ed. Boston: Butterworth Heinemann, 2001. ISBN 07-506-4567-9.
- [6] Composition of Investment Casting Wax. *Investment Casting Wax* [online]. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/structure.php>
- [7] HIRST, Richard. Understanding Investment Casting Wax. *Investment Casting Wax* [online]. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl9.pdf>
- [8] BOND, David. The Basics of Investment Casting Wax. *Investment Casting Wax* [online]. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl8.pdf>
- [9] BOND, David a Koji NISHIKAWA. Investment Casting Wax Technology. *Investment Casting Wax* [online]. [cit. 2018-02-09]. Dostupné z: <http://investmentcastingwax.com/downloads/tl5.pdf>
- [10] HANCOCK, Phil. Wax Fundamentals and Use with Ceramic Cores: The Blayson Group Ltd. Cambridge.
- [11] MAZŮREK, Tomáš. *Optimalizace skořepinové formy při výrobě odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu*. Brno, 2012. Diplomová práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Milan Horáček, CSc.
- [12] BERGNA, Horacio E. a William O. ROBERTS. *Colloidal Silica Fundamentals and Applications*. Hoboken: CRC Press, 2005. ISBN 978-142-0028-706.
- [13] JONES, Samantha. *Improved Sol Based Ceramic Moulds for Use in Investment Casting*. Birmingham, 1993. Disertační práce. University of Birmingham.
- [14] LÜ, Kai, Xiang-dong LIU, Zhao-xin DU a Yan-fen LI. Bending strength and fracture surface topography of natural fiber-reinforced shell for investment casting process. *China Foundry*. 2016, **3**(3), 211-216.
- [15] JONES, Samantha a Chen YUAN. Investigation of fibre modified ceramic moulds for investment casting. *Journal of the European Ceramic Society*. 2003, **23**(3), 399-407. DOI: 10.1016/S0955-2219(02)00153-X. ISSN 09552219. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095522190200153X>

- [16] Additives Impact Shell Properties. In: *Ransom & Randolph* [online]. Maumee, OH, 2004 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/cc5f22_79769d167ead4100809db4169b3bd2aa.pdf
- [17] Surfactants in Colloidal Silica Slurries. In: *REMET - Supplier to the Investment Casting Industry* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://www.remet.com/uk/remet_insights/surfactants-colloidal-silica-slurries/
- [18] HOLMBERG, Krister. *Surfactants and polymers in aqueous solution*. 2. Hoboken, NJ, 2003. ISBN 04-714-9883-1.
- [19] Antifoam selection and use. In: *REMET - Supplier to the Investment Casting Industry* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://www.remet.com/uk/remet_insights/antifoam-selection-use/
- [20] FRULLI, Danilo. *Alumina and Silico-Aluminate Refractories*. IMERYS. Bilbao, 2006.
- [21] Al — White Fused Aluminum Oxide. In: *Electro Abrasives* [online]. Buffalo, NY, 2015 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://www.electroabrasives.com/files/2451/File/AOW_Refractory_PI.pdf
- [22] BTUS - Brown Aluminum Oxide. In: *Electro Abrasives* [online]. Buffalo, NY, 2015 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://www.electroabrasives.com/files/2451/File/AOB_BTUS_PI.pdf
- [23] Fused Mullite - Properties and Applications of Duramul From Washington Mills. In: *AZO Materials* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5442>
- [24] DUBREUIL, P., É. FILARI a V. M. SOBOLEV. Use Of Andalusite Refractories In Ferrous Metallurgy. *Refractories and Industrial Ceramics*. 1999, 40(5-6), 252-259. DOI: 10.1007/BF02762295. ISSN 1083-4877. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02762295>
- [25] Mesh nad Micron Sizes. *ISM* [online]. Englewood, CO, 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.industrialspec.com/resources/mesh-and-micron-sizes>
- [26] FRULLI, Danilo, Thomas KRUMREI a Joachim WOLFF. Latest Trends in Refractory Minerals for Primary and Back-up Coats. IMERYS.
- [27] BIJVOET, Mark. Ceramic Shell Slurry Preparation and Control. CMRDI Cairo, 2007.
- [28] KOLCZYK, J., Ł. JAMROZOWICZ a N. KAŹNICA. Rheological Properties of Typical Ceramic Slurries Used in the Lost Wax Technology. *Archives of Foundry Engineering*. 2017, 17(1), 197 - 201. DOI: 10.1515/afe-2017-0035. ISSN 2299-2944. Dostupné také z: <http://content.sciendo.com/view/journals/afe/17/1/article-p197.xml>
- [29] *Atlas of Shell Defects*. 1. Montvale, NJ: Investment Casting Institute, 1987. ISBN 9781560610045.
- [30] A Guide to pH Measurement. In: *METTLER TOLEDO* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://www.mt.com/mt_ext_files/Editorial/Generic/1/Guides_to_Electrochemical_Analysis_0x000248ff00025c9a00093c4a_files/guideph.pdf

- [31] Economical pH Meter. In: *OMEGA* [online]. St-Eustache, QC [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://www.omega.ca/pptst_eng/PHH221_PHH222.html
- [32] Slurry Make Up and Control: ICI Industry Certification Program. Montvale, NJ.
- [33] SCHACHT, Charles A. *Refractories Handbook*. New York: Marcel Dekker, 2004. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 178. ISBN 978-0824756543.
- [34] Method for Gas Permeability Measurement: ITCA IMERYYS. Villach.
- [35] KOPECKÁ, Jitka a Petra ŠALAMÚNOVÁ. Elektronová mikroskopie. In: *FCHI VŠCHT Praha* [online]. Praha [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/0069~~c_WNDwtRSE3JLAEA.pdf?redirected
- [36] ŽIDEK, Ondřej. *Elektronová mikroskopie na biologických vzorcích*. Brno, 2011. Bakalářská práce. Masarykova univerzita. Vedoucí práce Doc. RNDr. Petr Mikulík, Ph.D.
- [37] ŠMATELKA, Jakub. *Technologie lití na vytavitelný model - přehled vad*. Brno, 2012. Bakalářská práce. FSI VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Vít Mikulka.
- [38] ELBEL, Tomáš. *Diagnostika a řízení kvality odlitků* [online]. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2018-05-21]. ISBN 978-80-248-3356-9. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/08_Diagnostika_a_rizeni_kvality_odlitku/Elbel_Diagnostika_a_rizeni_kvality.pdf
- [39] DOOLEY, Gavin. Investment Casting Strength – Part 3: Shell Materials. *REMET - Supplier to the Investment Casting Industry* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: http://www.remet.com/uk/remet_insights/investment-casting-strength-part-3-shell-materials/
- [40] DOOLEY, Gavin, S. BLACKBURN, S. RAMIREZ a K. Williamson. Effect of Stucco Application Method on the Mechanical Performance and Microstructure of Investment Casting Shells. In: *60TH TECHNICAL CONFERENCE & EXPO 2013*. Investment Casting Institute, 2013, s. 1-18.

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 – Princip technologie [3]
- Obr. 2 – Závislost tvrdosti vosku na teplotě [4]
- Obr. 3 – LBBC Boilerclave [lbbc.com]
- Obr. 4 – Struktura vodního koloidního křemičitého solu [4]
- Obr. 5 – Vznik částic SiO₂ u metody výměny iontů [12]
- Obr. 6 – SEM snímek vláken – a) nylon, b) – orobincová vlákna [14, 15]
- Obr. 7 – Struktura surfaktantu [18]
- Obr. 8 – Fázové diagramy – a) zirkon-křemen, b) korund-křemen [20]
- Obr. 9 – a) Zirkonový písek, b) Hnědý tavený korund, c) Bílý tavený korund [20]
- Obr. 10 – a) Tavený mullit, b) Molochit, c) Tavený křemen [20]
- Obr. 11 – Udržovací tank s nízkou rychlostí [27]
- Obr. 12 – Závislost viskozity na velikosti tření a teploty [28]
- Obr. 13 – pH metr [31]
- Obr. 14 – Plate weight test [32]
- Obr. 15 – Stanovení množství bakterií [32]
- Obr. 16 – Wetting test – a) špatné pokrytí, b) dobré pokrytí [32]
- Obr. 17 – Tepelná roztažnost žáruvzdornin [13]
- Obr. 18 – Tahové diagramy [33]
- Obr. 19 – Zkouška MOR [11]
- Obr. 20 – Skenovací elektronová mikroskopie [36]
- Obr. 21 – Výronek v koutu odlitku
- Obr. 22 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph 1
- Obr. 23 – Pevnost skořepiny Granisol 1
- Obr. 24 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph 2
- Obr. 25 – Pevnost skořepiny Granisol 2
- Obr. 26 – Výbrus skořepiny 1 green
- Obr. 27 – Výbrus skořepiny 1 hot
- Obr. 28 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph 1
- Obr. 29 – Prodyšnost skořepiny Granisol 1
- Obr. 30 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph 2
- Obr. 31 – Prodyšnost skořepiny Granisol 2
- Obr. 32 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph R1
- Obr. 33 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph R2

- Obr. 34 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph R1
- Obr. 35 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph R2
- Obr. 36 – Zadrobenina na kříži odlitku
- Obr. 37 – Odlitek s viditelnými bublinami
- Obr. 38 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph 1
- Obr. 39 – Podíl vad/zmetků skořepiny Granisol 1
- Obr. 40 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph 2
- Obr. 41 – Podíl vad/zmetků skořepiny Granisol 2
- Obr. 42 – Regresní přímka hodnoty pevnosti a podílu odlitků se zadrobeninami
- Obr. 43 – Regresní přímka hodnoty prodyšnosti a podílu odlitků s bublinami
- Obr. 44 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph R1
- Obr. 45 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph R2
- Obr. 46 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph M120
- Obr. 47 – Pevnost skořepiny Ransom & Randolph M120H
- Obr. 48 – Výbrus skořepiny F green
- Obr. 49 – Výbrus skořepiny G green
- Obr. 50 – Výbrus skořepiny H green
- Obr. 51 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph M120
- Obr. 52 – Prodyšnost skořepiny Ransom & Randolph M120H
- Obr. 53 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph M120
- Obr. 54 – Podíl vad/zmetků skořepiny Ransom & Randolph M120H
- Obr. 55 – Pevnost v ohybu – robotické obalování
- Obr. 56 – Prodyšnost – robotické obalování
- Obr. 57 – Pevnost v ohybu skořepin vyrobených ručně (ETAPA 1)
- Obr. 58 – Prodyšnost skořepin vyrobených ručně (ETAPA 1)
- Obr. 59 – Pevnost před a po modifikaci plniva
- Obr. 60 – Prodyšnost před a po modifikaci plniva
- Obr. 61 – Vztah typu sušení a podílu odlitků se zadrobeninami

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Přepočítání jednotek MESH [25]

Tab. 2 – Velikost částic [26]

Tab. 3 – Složení skořepiny Ransom & Randolph 1

Tab. 4 – Složení skořepiny Granisol 1

Tab. 5 – Složení skořepiny Ransom & Randolph 2

Tab. 6 – Složení skořepiny Granisol 2

Tab. 7 – Složení skořepiny Ransom & Randolph R1

Tab. 8 – Složení skořepiny Ransom & Randolph R2

Tab. 9 – Složení skořepiny Ransom & Randolph M120

Tab. 10 – Složení skořepiny Ransom & Randolph M120H

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

σ_f [MPa] – pevnost v ohybu

P [N] – zatěžující síla

L [mm] – rozteč podpor

b [mm] – délka vzorku

h [mm] – tloušťka vzorku

σ [MPa] – pevnost nehomogenního vzorku

σ_0 [MPa] – pevnost homogenního vzorku

B [-] – konstanta

P [%] – podíl pórů