



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**VLIV PARAMETRŮ UNIAXIÁLNÍHO LISOVÁNÍ NA
VÝSLEDNÉ VLASTNOSTI KERAMIKY PRO BALISTICKÉ
APLIKACE**

INFLUENCE OF UNIAXIAL PRESSING CONDITIONS ON FINAL CERAMICS AIMED FOR BALLISTIC APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Malý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Kachlík, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství
Student: **Martin Malý**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Kachlík, Ph.D.**
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 bakalářské práce:

Vliv parametrů uniaxiálního lisování na výsledné vlastnosti keramiky pro balistické aplikace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vlastnosti keramických materiálů jsou z velké části dány kvalitou jejich polotovarů – tedy vytvarovaným neslinitým prefabrikátem. U většiny komerčně dostupných keramických výrobků, které jsou určeny pro balistické aplikace, jsou tyto polotovary vytvořeny uniaxiálním lisováním práškových materiálů. Parametry tohoto výrobního procesu (rozměry vylisku, lisovací tlak, rychlost náběhu a uvolnění lisovacího tlaku atd.) pak významně ovlivňují výslednou relativní hustotu keramického polotovaru a distribuci jeho pórů. Slinutý keramický pancíř tak může díky optimalizaci těchto proměnných poskytovat daleko lepší ochranu při použití stejného práškového materiálu.

Cíle bakalářské práce:

1. Zpracovat literární rešerši z oblasti tvarování keramických polotovarů metodou uniaxiálního lisování a výroby moderních balistických keramických materiálů.
2. Optimalizovat proces uniaxiálního lisování pro vybraný práškový materiál za účelem dosažení co možná nejlepších vlastností výsledného materiálu pro balistickou ochranu.

Seznam doporučené literatury:

CARTER, C. B., NORTON, M. G. Ceramic materials: science and engineering; Springer: New York, 2007.

KATSNEL'SON, L. M., KERBEL B. M. Determination of the Optimal Uniaxial Pressing Pressure for Ceramic Powders. GLASS AND CERAMICS, 2014, vol. 70, issue 9-10, p. 319-323.

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

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

V této bakalářské práci byla provedena literární rešerše přípravy pokročilých keramických materiálů se zaměřením na uniaxiálnímu lisování a literární rešerše z oblasti personální balistické ochrany. Experimentální část byla věnována přípravě objemové Al_2O_3 keramiky uniaxiálním lisováním. U vylisovaných a slinutých vzorků byla stanovena relativní hustota výlisků i následně slinutých keramických těles. Získané výsledky byly diskutovány z hlediska vlivu rozměrů výlisků, lisovacího tlaku a výdrže na lisovacím tlaku. U vybrané série těles byla stanovena tvrdost dle Vickerse. Výsledkem experimentální práce bylo úspěšné určení optimálních parametrů procesu uniaxiálního lisování z hlediska relativní hustoty a dosažené tvrdosti slinutého Al_2O_3 tělesa vyrobeného z komerčně dostupného prášku. Takto připravené materiály jsou vhodné pro aplikaci v oblasti balistické ochrany.

Klíčová slova

pokročilá keramika, Al_2O_3 , uniaxiální lisování, personální balistická ochrana

Abstract

This bachelor thesis is a literary research on the preparation of advanced ceramics with a focus on the uniaxial pressing. The focus is also on the literary review of personal ballistic protection. The experimental part of the thesis was dedicated to the preparation of the Al_2O_3 ceramics by uniaxial pressing. Relative green density and relative density of sintered samples were measured. The acquired results were discussed in terms of impact of the dimension of the green bodies, pressing pressure and endurance of the pressing pressure. Hardness according to Vickers was measured in a group of chosen samples. The result of the experimental part was successful determination of optimal parameters for the process of uniaxial pressing in terms of relative density and achieved hardness of sintered Al_2O_3 material. Advanced ceramics prepared this way are suitable for ballistic protection.

Key words

advanced ceramics, Al_2O_3 , uniaxial pressing, personal ballistic protection

Bibliografická citace

MALÝ, M. *Vliv parametrů uniaxiálního lisování na výsledné vlastnosti keramiky pro balistické aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 63 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Kachlík, Ph.D.

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, na základě uvedených literárních pramenů a pod vedením vedoucího mé bakalářské práce.

V Brně dne 22. května 2018

.....

Martin Malý

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinovi Kachlíkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky během vypracování této práce. Dále pak všem pracovníkům na Odboru keramiky a polymerů na Ústavu materiálových věd a inženýrství, VUT Fakulty strojního inženýrství Brno.

V Brně dne 22. května 2018

.....

Martin Malý

Obsah

1 Úvod.....	3 -
2 Teoretická část – výroba keramických materiálů	4 -
2.1 Příprava směsi	4 -
2.2 Způsoby tvarování keramických polotovarů	4 -
2.2.1. Suché tvarování	5 -
2.2.2 Mokrý tvarování	10 -
2.2.3 Plastické tvarování.....	11 -
2.2.4 Aditivní technologie	13 -
2.3. Sušení	13 -
2.4 Slinování	13 -
2.5 Dokončovací operace	16 -
3 Teoretická část – osobní balistická ochrana	17 -
3.1 Historie a vývoj.....	19 -
3.2 Současný stav poznání.....	25 -
3.3 Složení balistické ochrany	25 -
3.3.1 Měkká vrstva.....	26 -
3.3.2 Tvrdá vrstva	26 -
3.3.3 Antišoková vrstva – tlumič rázu.....	27 -
3.4 Materiály pro osobní balistickou ochranu	27 -
3.4.1 Měkké materiály.....	28 -
3.4.2 Tvrdé materiály	29 -
3.5 Materiály budoucnosti.....	31 -
3.6 Shrnutí balistické ochrany	32 -
4 Experimentální část.....	33 -
4.1 Práškový materiál.....	33 -
4.2 Uniaxiální lisování	34 -
4.3 Slinování	35 -
4.4 Měření hustoty	35 -
4.5 Měření tvrdosti.....	36 -
5 Výsledky a diskuze	37 -
5.1 Vylisované vzorky	37 -
5.2 Slinuté vzorky	38 -

5.2.1 Vliv lisovacího tlaku.....	- 38 -
5.2.2 Vliv výdrže na lisovacím tlaku.....	- 40 -
5.2.3 Vliv lisovacího tlaku na tvrdost vzorku.....	- 43 -
6 Závěr.....	- 45 -
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	- 46 -
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	- 51 -
9 SEZNAM OBRÁZKŮ	- 52 -

1 Úvod

Keramické materiály lze zařadit jednak mezi nejstarší materiály, které lidstvo vyrobilo (tradiční hrnčířská keramika) a jednak mezi nejnovější, komplikované a dosud zkoumané materiály, jejichž vývoj zaznamenal největší rozmach až v moderní době. Materiály jako takové lze rozdělit do tří základních kategorií a to kovy, polymery a keramika. Kovová vazba (charakterizující kovy) je tvořena atomy, jejichž valenční elektrony tvoří elektronový plyn kolem kladně nabitých iontů. Volné elektrony dávají kovům jejich typické vlastnosti (například velkou tepelnou a elektrickou vodivost, nízkou tvrdost, plasticitu, kovový lesk). Polymer je na druhou stranu makromolekula formována kovalentní vazbou a skládající se z jednotlivých merů (základních jednotek). Keramika je obvykle spojována s kombinovanou vazbou (kovalentní a iontová). [1]

V současné době je věnována velká pozornost pokročilým keramickým materiálům, které jiné materiály převyšují v mnoha vlastnostech jako je vysoká pevnost, většinou nízká elektrická a tepelná vodivost, odolnost proti vysokým teplotám, odolnost vůči korozi a další. Pokročilou keramiku lze zjednodušeně vyrobit zpracováním čistého práškového materiálu, tvarováním a následně jeho slinováním (vypálením). Tvarováním získáváme zpevněný polotovar určité geometrie. Volba tvarovací metody závisí na velikosti polotovaru, požadovaném množství výrobků, jejich tvaru a samozřejmě i na výsledné ceně. [1]

Pro pokročilou keramiku se nejčastěji užívá oxid hlinitý (Al_2O_3), který se vyznačuje především vysokou pevností a dobrou elektrickou izolací. Jeho další nesporně důležitá výhoda je relativně nízká cena. Jako další materiály pokročilé keramiky lze uvést oxid zirkoničitý, karbid křemíku, oxid hořečnatý, oxid titaničitý či oxid křemičitý. Obecně se dá říci, že neoxidová keramika je díky náročnosti své výroby vždy dražší než oxidová.

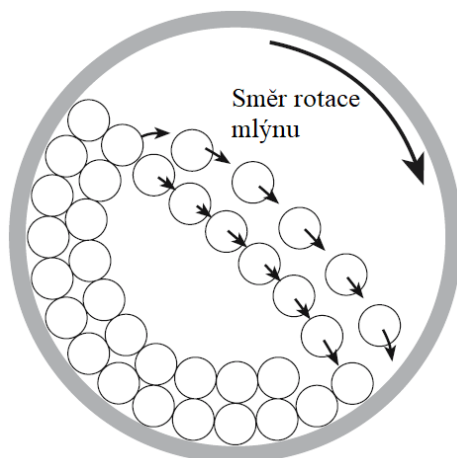
Pokročilá keramika se v mnoha aplikacích používá jako balisticky odolný materiál. Požadavky na takové materiály jsou pak především vysoká tvrdost, nízká hustota a z ní plynoucí nižší výsledná hmotnost než u klasických kovových pancířů. Na druhou stranu se keramika vyznačuje absencí možnosti plastické deformace a s tím spojenou nízkou houževnatostí, špatnou odolností proti teplotním šokům a vyšší pořizovací cenou. Moderní balistické pláty se skládají z několika vrstev, které dohromady tvoří balisticky odolný materiál s různou třídou balistické odolnosti.

2 Teoretická část – výroba keramických materiálů

2.1 Příprava směsi

První krok při výrobě keramického výrobku je příprava směsi. U materiálu snadno dostupného v přírodě se jedná o těžbu a jeho následné zpracování. V případě, že je materiálu v přírodě málo nebo se vůbec přirozeně nevyskytuje, je třeba materiál vyrobit uměle – synteticky. Metody vhodné pro výrobu prášku lze rozdělit do tří kategorií – mechanické, chemické a rozprašovací. [1]

Mechanické metody pracují s hrubozrnnými materiály. Materiály jsou postupně rozměňovány a velikost částice je zmenšována. Posledním krokem metody je mletí, kde je dosaženo částice o požadované velikosti. Využívá se například kulového nebo vibračního mlýnu. Metody jsou v porovnání s ostatními levné, avšak kvalita prášku není příliš vysoká. Na obr. 1 je znázorněn pohyb částic uvnitř kulového mlýnu. Chemické metody slouží k umělé výrobě prášků. U chemických metod lze kontrolovat tvar a čistotu. Používají se především pro výrobu pokročilé keramiky. Výroba rozprašováním je založena na rozprašování kapiček taveniny do ochlazovací komory. Vzniká prášek o vysoké čistotě. [1]



Obr. 1: Příčný průřez mlýna znázorňující pohyb částic materiálu [1]

2.2 Způsoby tvarování keramických polotovarů

Tvarování je proces přeměny keramického prášku na slabě vázaný kompaktní prášek, jinak označován také jako green body. S keramickým polotovarem lze v této podobě při opatrném zacházení poměrně bezpečně manipulovat bez vzniku vad. Green body je však velmi křehké a lze jej snadno znehodnotit. Existuje více možností, jakými lze dosáhnout požadovaného tvaru polotovaru. Způsoby, které jsou vhodné pro zhutnění prášku, závisí na tvaru částic prášku a distribuci jejich velikosti. Green body se různí svými rozměry, tvarem, složitostí, materiálovým složením, strukturou i s tím souvisejícími náklady na výrobu. Způsoby tvarování lze rozlišit dle mnoha kritérií, například podle vlhkosti, tvarovací teploty, tlaku, užití atmosféry (vzduch, inertní plyn, vakuum), homogenity či obsahu přídavných látek. Obecně tvarovací metody rozdělujeme dle vstupního materiálu do čtyř kategorií: suché tvarování (jednoosé lisování, izostatické lisování), mokré tvarování (slip casting, gel casting, tape casting), plastické tvarování (injekční vstřikování, extruze) a výroba bez forem. [1]

2.2.1. Suché tvarování

Používá se pro suché prášky případně prášky s přídavkem vhodného maziva. Druh používaného lisu (tedy i lisovací formy) závisí na složitosti tvaru výrobku. Během lisování probíhají dva procesy. Jsou to uspořádání částic směsi a deformace (případně lom částic nebo deaglomerace – rozbití aglomerovaných bloků). Uspořádání částic probíhá ve směru lisovací síly, tím se dosáhne vyšší relativní hustoty materiálu. K deformaci či případnému lomu částic dochází působením vysokého tlaku. Většího zhutnění lze dosáhnout zvětšením působícího tlaku, snížením pevnosti a tvrdosti částic, snížením rychlosti zalisování. [2] Rovnoměrnost objemové hmotnosti polotovaru záleží na rovnoměrnosti násypu lisovací směsi do formy, způsobu působení lisovací síly, poměru výšky k šířce, rozměru a tvaru průřezu formy. [2]

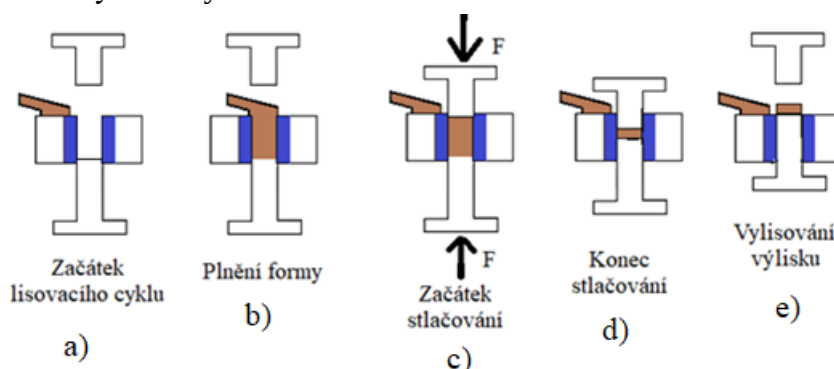
Uniaxiální lisování

Metoda uniaxiálního (jednoosého) lisování je vhodná i pro velkosériovou výrobu jednoduchých tvarů, především díky svým nízkým provozním nákladům a pořizovací ceně. Při této metodě jsou geometrické (tvarové) možnosti polotovaru značně omezeny. Jednoosé lisování je nejrozšířenější metoda zhutňování keramických prášků. Proces uniaxiálního lisování se skládá z několika fází, uvedených v obr. 2. Jsou to fáze plnění formy, zhutňování (lisování) a vyjmutí pevné komponenty (vylisování výlisku – green body).

Plnění formy – v této fázi je přesně odměřené množství keramického prášku nasypáno do připravené formy (dutiny). Vhodná velikost částic je v rozmezí 20-200 μm . [1] Příliš velké množství malých částic by omezilo pohyb jednotlivých částic a lepily by se na písty, což by snížilo hustotu polotovaru. [1]

Zhutňování – horní píst se pohybuje směrem dolů a stlačuje prášek definovaným tlakem. Velikost tlaku se různí, obvykle se pohybuje do 300 MPa. Použitý tlak záleží na druhu materiálu, aby se dosáhlo co největší relativní hustoty a do polotovaru nebylo vneseno příliš velké vnitřní napětí, které by mohlo negativně ovlivnit další fáze výrobního procesu.

Vysunutí a odebrání green body – horní píst se vysune zpět do základní polohy a spodní píst vytlačí green body z formy.



Obr. 2: Fáze procesu uniaxiálního lisování

Pokud se lisovací proces odehrává za pokojové teploty, tento způsob lisování se nazývá lisování za studena (cold pressing). Pro snížení tření (z důvodu zamezení vzniku a šíření trhlin) se do prášku přidávají vhodná maziva, nebo se mazivy potírají přímo kontaktní plochy formy. Běžná maziva pro snížení tření jsou MoS_2 , stearáty nebo silikon. [3] Nástroje jsou vyrobeny z tvrdých a odolných materiálů (nástrojové oceli), aby vydržely velké množství cyklů. [3]

Hlavní výhody jednoosého lisování:

- poměrně vysoká relativní měrná hustota keramických polotovarů, odvislá od materiálových vlastností a použitém tlaku
- dobrá manipulační pevnost výlisku
- absence procesu sušení díky minimálnímu obsahu přídavných látek
- hladký a kvalitní povrch odvislý od povrchové úpravy formy
- vysoká účinnost díky nízkému pracovnímu času jednoho cyklu
- nízká cena

Naopak mezi hlavní nevýhody se řadí:

- geometrické omezení lisovaných tvarů
- nehomogenní hustota polotovaru, především u výlisků s vysokým poměrem výšky k průměru

Výsledné vlastnosti finálního výrobku jsou výrazně dány již při procesu lisování, tedy při tvorbě green body. Vlastnosti polotovaru jsou ovlivněny vlastnostmi samotného práškového materiálu (velikostí částic), ale i způsobem lisování. Na výsledné vlastnosti vzorku, potažmo mikrostruktury, má vliv primárně jeho relativní hustota, která je úzce spjata s porozitou. Ta je ovlivňována způsobem plnění formy, způsobem vylišování, třením, úpravou prášku před zhutněním či volbou pojiva.

Je zřejmé, že velikost relativní hustoty polotovaru je silně odvislá od působícího tlaku. Již v roce 1938 byla zavedena závislost mezi těmito dvěma hodnotami. Balshin [4] ve své práci uvádí vztah

$$\ln p = A \cdot V + B, \quad (1)$$

kde P je působící tlak, V je objemový podíl prášku ve formě a A a B jsou konstanty.

Tento vztah se v průběhu let nadále vyvíjel a modifikoval s příchodem počítačových simulací a matematických modelů. [5]

Granulování prášku má výrazný vliv na snížení gradientu hustoty. Tato technika je využívána k zvýšení celkové hustoty polotovaru. Metoda dovoluje zhutňovat tlustší výrobky. Pomocí metody jsou také zmenšovány póry mezi částicemi. [5]

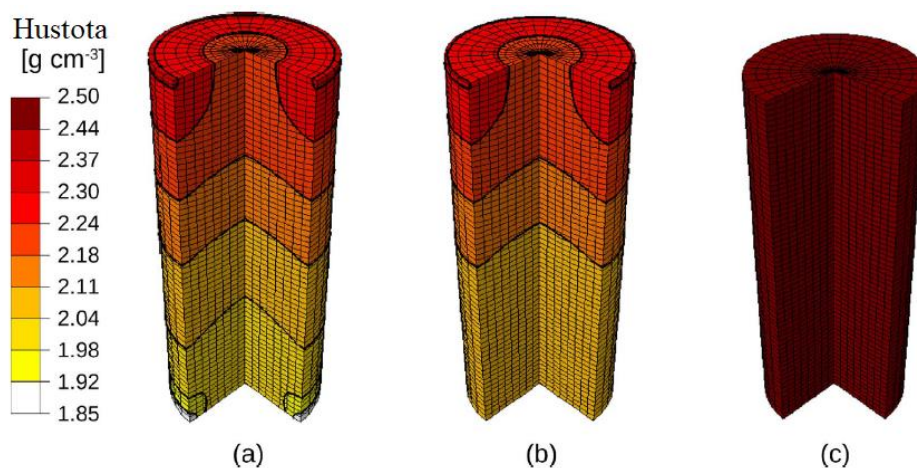
Vliv *způsobu plnění* je kritický ve výrobě polotovaru. Během plnění mohou vznikat vzduchové kapsy a tunely, které mají za následek nehomogenní porozitu a vznik napětíových polí vedoucích až k poruchám (prasklinám a trhlinám) či významnému snížení manipulační pevnosti green body. [5]

Thompson [6] ve své práci zjistil, že velký vliv na výsledný polotovar má *poměr délky k šířce* vzorku, *index tekutosti* prášku a *koeficient tření* mezi stěnou formy. Index tekutosti je poměr mezi radiálním a axiálním napětím ve formě. Pro kapaliny je tento index 1. Pro keramické prášky tento index závisí na vnitřním koeficientu tření daného prášku. [5]

Dalším podstatným vlivem na výsledné vlastnosti polotovaru má *odpružení*. Při lisování se mezi částicemi kumuluje napětí, které má po uvolnění pístu za následek elastické odpružení. Touto elastickou deformací se tak může změnit výsledná geometrie polotovaru. Odpružení pak může mít za následek vznik póru na povrchu. [5]

Tření formy je považováno za hlavní příčinu vysokých gradientů hustoty a způsobuje mnoho defektů ve výsledném polotovaru. Pro snížení tření jsou stěny formy a písty mazány. Mazivo snižuje opotřebení pístů a zlepšuje geometrickou přesnost formy – snižuje vůle. Mazání také ovlivňuje poměr axiálního a radiálního napětí. Radiální síly vzniknou v důsledku sil axiálních, které tvoří pohybující se píst. Zvyšující se radiální síly pak způsobují zvyšování tření mezi stěnou formy. To vede ke zvyšování gradientu hustoty a elastickým deformacím po odlehčení. [7] V práci [7] bylo prokázáno, že se zvyšujícím se koeficientem tření roste rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou hustoty. [7] V práci pana Briscoe [8] je vyšetřován vliv tření formy při různých výškách vzorku. Bylo prokázáno, že se zvyšujícím se poměrem délky k šířce se zvyšuje i tření, což znamená i síla potřebná k vylišování vzorku. Bez použití maziva jsou větší radiální síly, a tedy i síla potřebná k vylišování. Tlak potřebný k vylišování se také zvýší zvýšením lisovacího (zhuťovacího) tlaku, z důvodu zvýšení radiálních sil. [8]

Uniaxiální lisování je jedna z nejdůležitějších metod tvarování keramických polotovarů. Ovšem velký problém je dosažení rovnoměrné relativní hustoty vzorku touto metodou. Více či méně nehomogenní rozložení hustoty je ovlivňováno geometrií polotovaru, geometrií nástroje a třením mezi stěnou formy. Z tohoto důvodu se provádějí počítačové simulace na rozložení hustoty ve vzorku. [7] Na obr. 3 lze vidět numerickou simulaci závislosti hustoty polotovaru na vzdálenosti od působící síly. Pro experimentální zjištění hodnot byl použit vzorek o průměru 50 mm a výšce přibližně 200 mm. Poměr výšky k šířce je relativně vysoký a nepříliš vhodný pro uniaxiální lisování. Je tedy zřejmé, že tření mezi práškem a stěnou formy vede k velkému gradientu hustoty při jednostranném uniaxiálním lisování (obr. 3a). Na obr. 3b) je znázorněno rozdělení hustoty po izostatickém přelísování za studena při tlaku 25 MPa. Je vidět, že v nižší části vzorku je hustota homogenní. Tlak nebyl však dostatečně vysoký na to, aby byla hustota stejná po celém objemu vzorku, jako je tomu u obr. 3c). Zde byl vzorek lisován izostaticky pod tlakem 200 MPa. Při vysokém tlaku se tedy jeví vliv tření formy jako zanedbatelný. [9]



Obr 3: Znázornění hustoty v závislosti na vzdálenosti od působící síly po a) jednostranném uniaxiálním lisování a vylišování vzorku b) následném izostatickém přelísování při 25 MPa c) izostatickém přelísování při 200 MPa [9]

Jak je uvedeno v práci [10], vyšší poměry zhutnění vedou k vyšším relativním hustotám polotovaru a následně i k vyšším relativním hustotám slinovaných vzorků. Výsledky z práce [10] jsou uvedeny v tab. 1. V práci byl použit práškový materiál alfa Al_2O_3 o velikosti částice

0,2 mikrometru od firmy Sumitomo chemical o čistotě 99 %, slinovací teplota byla okolo 1600 °C. V práci bylo dosaženo vysoké relativní hustoty vzorku, navíc se zvyšujícím se kompaktním poměrem se snižuje porozita.

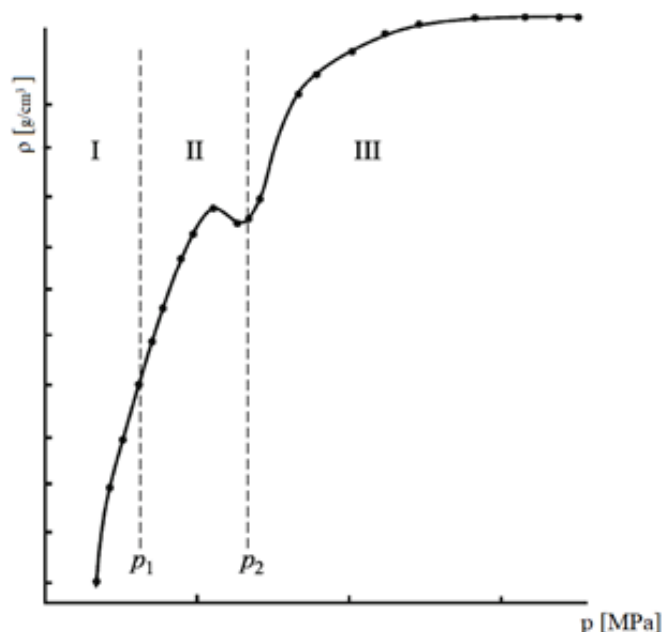
Tab. 1: Naměřené hodnoty závislosti tlaku na kompaktním poměru [10]

Tlak [MPa]	Kompaktní poměr	Relativní hustota polotovaru [%]	Relativní hustota slinovaného vzorku [%]
36	3,8	41	94
107	4,9	51	95
178	5,6	55	95
285	7,1	64	96
321	7,7	67	97
576	8,1	71	98

Volba optimálního tlaku

Rozhodnutí o optimálním lisovacím tlaku má dominantní vliv na homogenitu výsledné mikrostruktury. Při zkoumání mikrostruktury a hustoty polotovarů bylo zjištěno, že prvotní proces stlačování polotovaru lze rozdělit na tři základní části. Na obr. 4 je vidět rozdělení do těchto tří částí.

První část ($0 < p < p_1$) je charakterizována zhutněním granulovaného prášku pohybem jednotlivých částic (vlivem působícího tlaku). Pohyb částic probíhá až do té doby, dokud prášek nedosáhne požadovaného tvaru. V této fázi se hustota green body mění lineárně a jednotlivá zrna prášku se nelámou. Mezi zrny zanikají veškeré mezery. Při vyšších tlacích dochází k elastické deformaci a následně k prvním zlomením jednotlivých zrn. Kontaktní plocha mezi jednotlivými částicemi dosahuje maxima před tím, než dojde k lomu částic. Tlak p_1 definovaný tímto momentem vymezuje první část. Ve druhé lisovací části ($p_1 < p < p_2$) se kvůli zvýšení tlaku částice zlomí. Výsledkem zlomení částic je výrazný pokles hustoty. Druhá fáze je prakticky ukončena rozbitím původních zrn a aglomerátů a je tedy ohraničena tlakem p_2 . Ve třetí fázi ($p > p_3$) jsou jednotlivé zlomené částice dále zhutňovány a stávají se novými konstrukčními prvky. Se zvyšujícím se tlakem dochází ke zvýšení elasticity jednotlivých částic prášku a tím dochází k soustředění vnitřního napětí. To vede k rozvoji mikrotrhlin ve vzorku. Defekty mikrostruktury (mikrotrhliny) se zformují vlivem zbytkového mechanického pnutí po odstranění zatížení. Pokud je optimalizačním kritériem pro lisovací tlak zachování požadovaných fyzikálních vlastností s minimálním rozptylem, pak jako optimální lisovací tlak volíme $p_{op}=p_1$ [11]

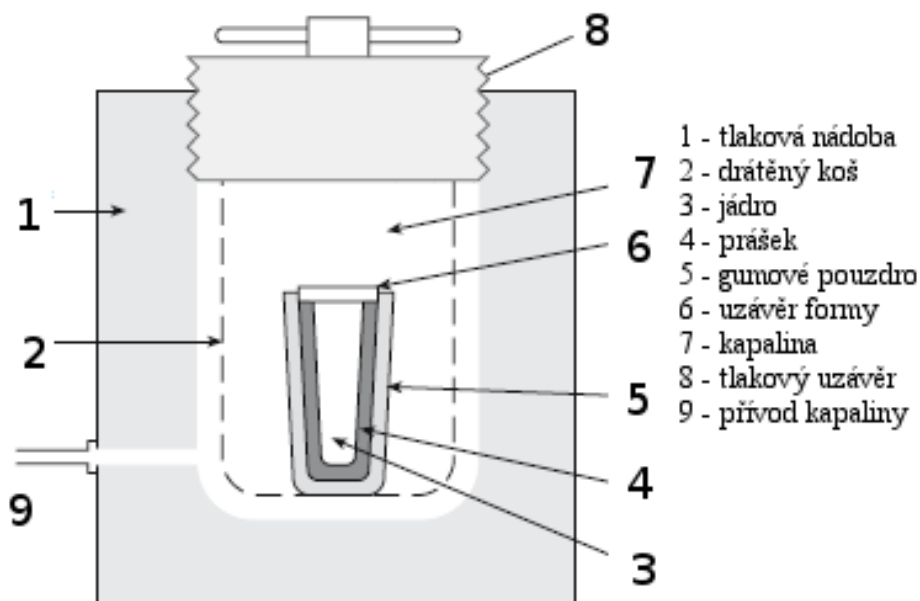


Obr. 4: Závislost lisovacího tlaku na hustotě green body [11]

Izostatické lisování

Izostatické lisování je metoda suchého lisování práškového materiálu, kde tlak působí ze všech směrů na rozdíl od lisování jednoosého. Toho je dosahováno pomocí kapalného média nebo plynu, který obklopuje zhutňovanou část. Z čehož plyne největší výhoda izostatického lisování – hustota polotovaru je rovnoměrnější než u jednoosého lisování.

Metoda izostatického lisování za studena (Cold Isostatic Pressing – CIP) je výrobní proces formování keramického či kovového prášku. Metoda využívá kapaliny, obvykle oleje, vody nebo glykolu, které přenášejí tlak na prášek. Prášek je umístěn v polymerní formě. Elastická forma má tvar budoucího polotovaru a brání, aby se lisovací tekutina nedostala k prášku. Pomocí vysokých tlaků se prášek může rozpadnout na menší částice a mezery v prášku se díky tomu více zmenší či odstraní úplně, nebo-li relativní hustota roste. Tlaky se u této metody většinou pohybují v rozmezí 100 až 600 MPa a teplota je pokojová. CIP lze dále rozdělit na lisování do mokré formy (wet bag) a suché formy (dry bag). U metody wet bag je forma vyjmuta a znovu naplněna po každém cyklu. Metoda je vhodná především pro zhutnění velkých a tvarově komplikovanějších polotovarů. U metody dry bag je forma součástí celé nádoby. Dry bag se užívá pro menší a tvarově jednodušší polotovary. Mezi hlavní výhody CIP lze zařadit vyšší jednotnost zhutnění a větší diverzitu zhutňovaných tvarů polotovarů. Schematické znázornění metody CIP s lisováním do mokré formy je na obr. 5.

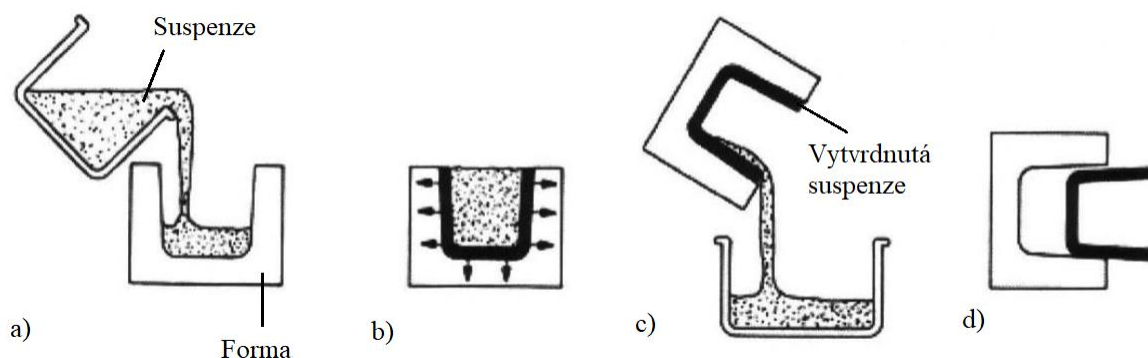


Obr. 5: Izostatické lisování [1]

2.2.2 Mokrý tvarování

Suspenzní lití – slip casting

Metoda se využívá především pro výrobu dutých výrobků. Suspenzní lití spočívá na principu nalití suspenze do formy, která má tvar výrobku (obr. 6a). Polopropustná forma, jež je vyrobena z porézního materiálu (sádra, porézní polymer), pak absorbuje kapalinu ze suspenze (obr. 6b). K tomu dochází díky kapilárním silám, které způsobí na povrchu póru formy podtlak. Tenká vrstva suspenze částečně vytvrdne. Jakmile má polotvrdlá vrstva požadovanou tloušťku, je přebytečná suspenze vylita z formy (obr. 6c). Výrobek poté schne a zároveň dochází k jeho smrštění, což umožňuje snadné vyjmutí z formy. U tradiční keramiky je metoda využívána na výrobu konvic na čaj, nejrůznějších džbánů či umyvadel. V technických oborech se metoda využívá k výrobě keramických kelímků nebo plynových turbín. [1] Pomocí suspenzního lití se vyrábí nejen duté nádoby, ale i plné profily. Mezi varianty suspenzního lití řadíme lití pod tlakem a lití ve vakuu.



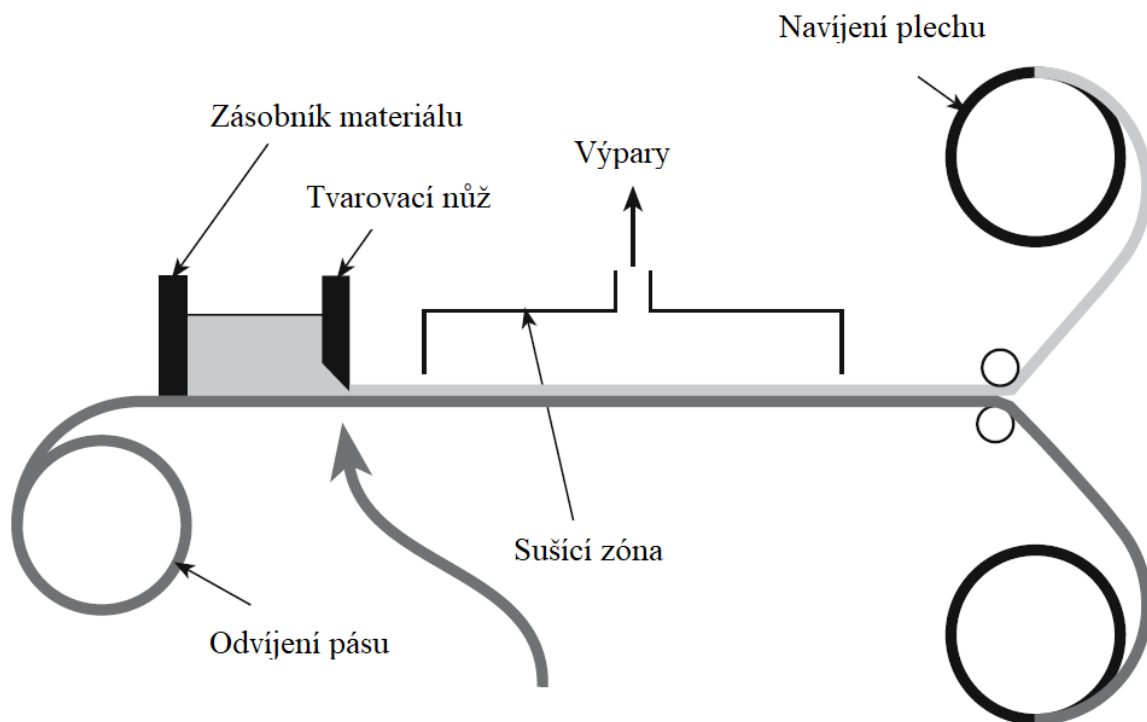
Obr. 6: Schéma suspenzního lití a) nalití suspenze do formy b) tvrdnutí suspenze c) vylití přebytečné suspenze z formy d) vyjmutí ztvrdlé suspenze z formy [3]

Přímé lící metody – gel casting

Metoda je založena na principu lití tekuté suspenze do pevné formy předem daného tvaru bez odstranění rozpouštědla. Ve formě dojde ke ztuhnutí pomocí procesu gelace. Gelace spočívá ve vytvoření vazeb mezi částicemi (Van der Waalsovy). Zásadním prvkem je připravit homogenní suspenzi s nízkou viskozitou s vysokým podílem keramického prášku. Během tuhnutí je potřeba odstranit vnější vlivy (vibrace), které by mohly mít za následek vznik heterogenit v materiálu. [12] Metoda je využívána na výrobu složitých součástí, kde se klade vysoký důraz na kvalitu zpracování, mechanické a optické vlastnosti. [13]

Tape casting

Tape casting se používá k výrobě tenkých keramických vrstev. Materiál (keramická suspenze) je nanášena na nosný film. Ten je i se suspenzí unášen pomocí pásu. Suspenze jedoucí po pásu je rozprostřena pomocí přesného nástroje (nože) na požadovanou tloušťku. Po následném sušení se odpařuje rozpouštědlo a vytváří se tenký výrobek. Jednotlivé pláty lze pak snadno nařezat. Schematický popis je znázorněn na obr. 7. Tloušťky plátů se většinou pohybují od 10 μm do 1 mm. [12]



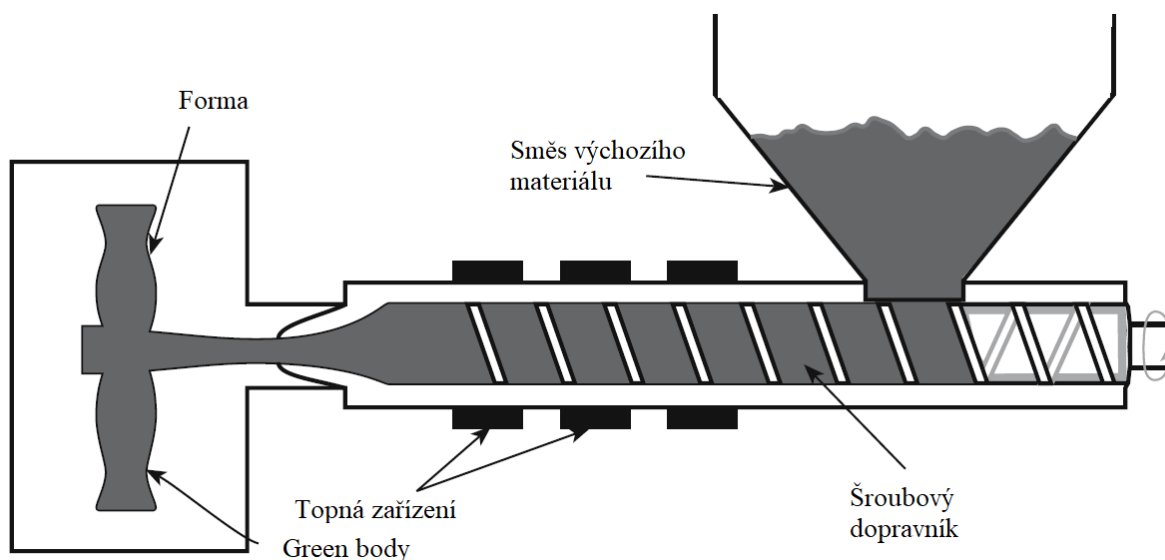
Obr. 7: Schéma metody tape casting [1]

2.2.3 Plastické tvarování

Injekční vstřikování

Injekční vstřikování se používá především u tvarování termoplastů. Termoplast je polymer, který je po zahřátí měkký a dostatečně plastický. Svou pevnost získá opět po zchladnutí, kdy znovu ztuhne. Výhodou termoplastů je, že tento proces může být opakován. Metoda může být použita i pro keramické komponenty, pokud je keramický prášek přidán do termoplastu. Termoplast je v tomto případě považován za pojivo. Ke keramickému prášku a pojivu je

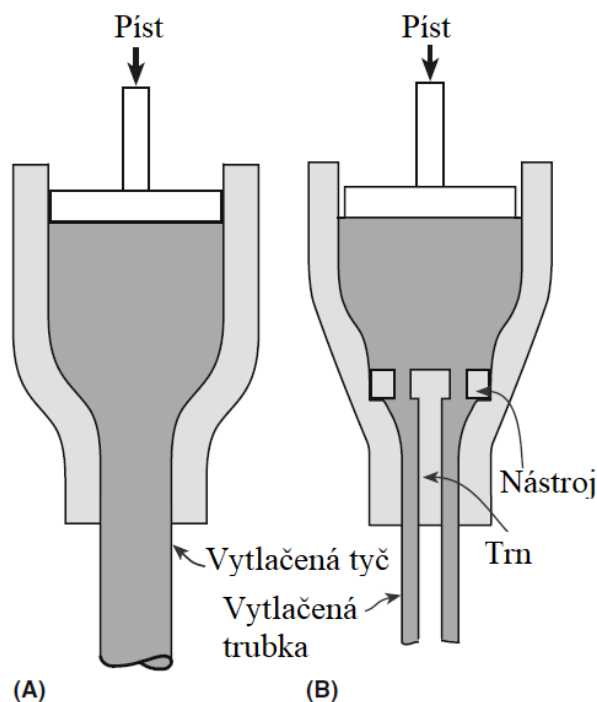
přidáno mnoho dalších organických látek, aby se dosáhlo požadovaných reologických vlastností. [1] Metoda injekčního vstřikování spočívá na principu zahřátí keramického prášku s pojivem (obvykle na bázi polymerů či vosků) na požadovanou teplotu, při které pojivo sníží svoji viskozitu. To probíhá ve šnekovém dopravníku. Po následném vstříknutí do dutiny formy a zchlazení pojivo ztuhne. Po úplném ochlazení výrobku může být green body z formy vyjmuto. Schéma injekčního vstřikování je popsáno na obr. 8. Díky vysokému podílu organických složek je nutné před slinováním zařadit krok dostatečně pomalého vypalování pojiva, aby vznikající těleso neporušil tlak vyvíjených plyných spalin. Vyhrořování se provádí obvykle v teplotním rozsahu okolo 300-700 °C. Kvůli tomuto kroku je metoda vhodná hlavně pro polotovary menších rozměrů. Pořizovací náklady jsou u této metody vysoké, ovšem metoda sama se používá pro velké série, kde náklady na výrobu jednoho výrobku jsou malé. Metoda dosahuje vysoké přesnosti výrobku i se složitou geometrií. Mezi nevýhody metody patří vysoká smršťivost výrobku kvůli vysokému obsahu pojiv, obvykle to je mezi 15 a 20 %. [1] Používá se např. na výrobu kloubních náhrad.



Obr. 8: Schéma injekčního vstřikování [1]

Extruze

Metoda extruze spočívá v tlačení předem zahřátého plastického materiálu skrze tvarovací nástroj. Metoda extruze se používá u keramických výrobků s neměnným průřezem a vysokým poměrem délky k šířce obr. 9. Materiál při extruzi je velmi podobný jako u injekčního vstřikování. Při použití Al_2O_3 se prášek smíchá s tekutinou (polyvinylalkohol, methylcelulóza) a vodou pro vytvoření potřebné konzistence směsi. [1] [3]



Obr. 9: Schéma metody extruze A) tyč B) trubka [1]

2.2.4 Aditivní technologie

Pro výrobu keramických polotovarů těmito metodami není zapotřebí forma. Tyto metody jsou často označovány anglickým souslovím „rapid prototyping”. Model je v systému rozdělen na jednotlivé vrstvy. Tyto vrstvy jsou postupně vytvářeny jedna na druhé, čímž se následně vytváří celý výrobek. Zmíněný obecný postup využívají například metody selektivní laserové slinování a 3D tisk. [14]

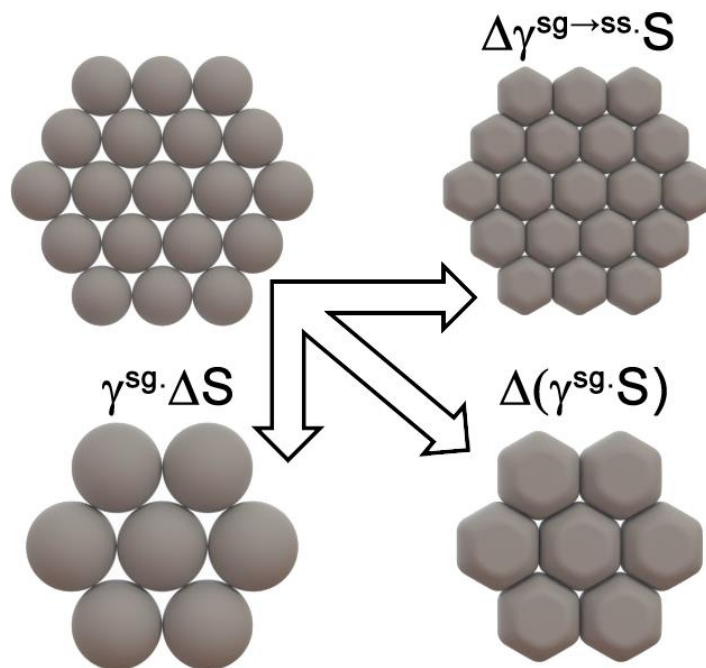
2.3. Sušení

Před procesem slinování nastává obvykle ještě sušení keramiky. Tento děj je energeticky velmi náročný a při výrobě keramiky tvoří až 30 % energetické náročnosti. [2] V průběhu je potřeba zamezit vzniku deformací a trhlin. Procesem sušení se snižuje množství vody – odpařováním rozpouštědel a dochází ke smrštění výrobku. A právě během smrštění výrobku nastávají nejvíce vady – porušení soudržnosti částic, popraskání. Vliv na proces sušení má teplota, tlak, vlhkost, rychlost i velikost a tvar výrobku. Mezi vnitřní podmínky, které celý proces ovlivňují se řadí vlastnosti sušeného materiálu, vlhkost, transport vlhkosti, tepelné vlastnosti a chování materiálu během sušení. [2]

2.4 Slinování

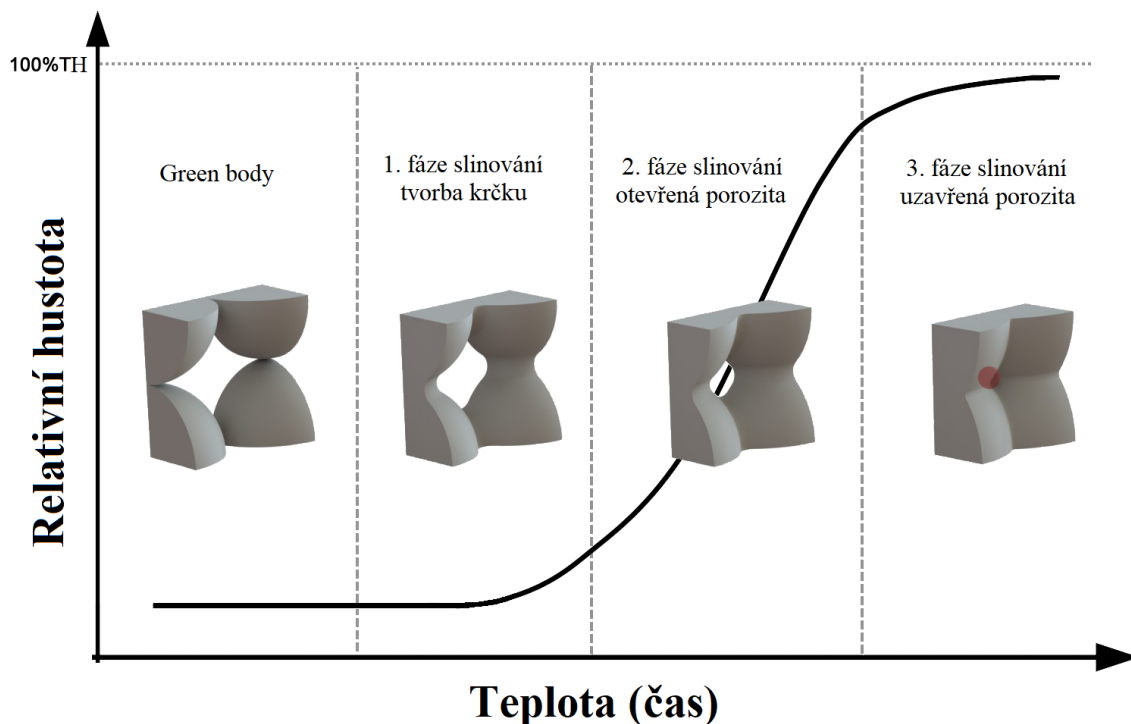
Slinování je zásadní (hlavní) fáze při výrobě pokročilé keramiky. Během slinování dochází ke spékání částic green body, čímž se těleso zhušťuje (obr. 10), tj. zvyšuje pevnost. Slinování probíhá při teplotách okolo $0,5-0,9 T_m$, kdy dochází ke spojování jednotlivých částic díky difuzi (mechanismus slinování). Hnací silou k vytvoření takového celku je povrchová energie volných keramických částic, která je vyšší než energie hranic zrn slinuté keramiky. [15] Povrch se zvětšuje se snižující se velikostí částic. Slinování probíhá rychleji u green body s menšími částicemi. Nejdůležitějšími faktory ovlivňující proces jsou teplota, použitá atmosféra a přidaná

aditiva. [16] Jak je vidět na obr. 10, během procesu slinování dochází jak ke spékání částic, tj zhutnění tělesa tak k nepříznivému jevu růstu (hrubnutí) zrn. Hrubnutí zrn způsobuje zhoršení mechanických vlastností (pevnost, tvrdost).



Obr. 10: Slinování (zhutnění a hrubnutí zrn) [17]

Slinování je tedy vysokoteplotní difuzní jev. Nejdůležitější mechanismy slinování pro pokročilou keramiku jsou mechanismy difuze po hranicích zrn a mřížková difuze. Tyto dva mechanismy vedou k uzavírání pórů a zhutňování green body. Slinování lze obecně rozdělit na tři fáze. Jednotlivé fáze jsou schematicky zobrazeny na obr. 11. V první fázi začíná tvorba tzv. krčků při kontaktu mezi částicemi. Ve druhé fázi se tyto krčky zvětšují, dochází ke snižování otevřené porozity a ke smrštění vzorku. Relativní hustota se pohybuje v rozmezí 65-90 %. Ve třetí fázi se póry uzavírají, nazývá se tedy uzavřená pórovitost. Relativní hustota se pohybuje nad 90 %. [2]



Obr. 11: Fáze slinování [17]

2.4.1 Slinování bez použití tlaku

Metoda, jindy také nazývaná konvenční metoda slinování, je velmi prostá. Jedná se o nejčastěji používanou metodu při slinování oxidové keramiky, a to především díky nízkým finančním nákladům. Spočívá v zahřátí vzorku konstantní rychlostí na požadovanou teplotu a výdrži na této teplotě. Metoda je velmi populární, především díky své dostupnosti. Lze ji provádět téměř v jakékoli běžné peci s dostatečnou teplotou.

2.4.2 Slinování za použití tlaku

Slinování za zvýšeného tlaku používám z důvodu snížení hrubnutí zrna a tím pádem zachování lepších mech. vlastností. Teplota při těchto metodách nedosahuje tak vysoké hodnoty jako u běžného slinování bez tlaku, růst zrna je pak minimální.

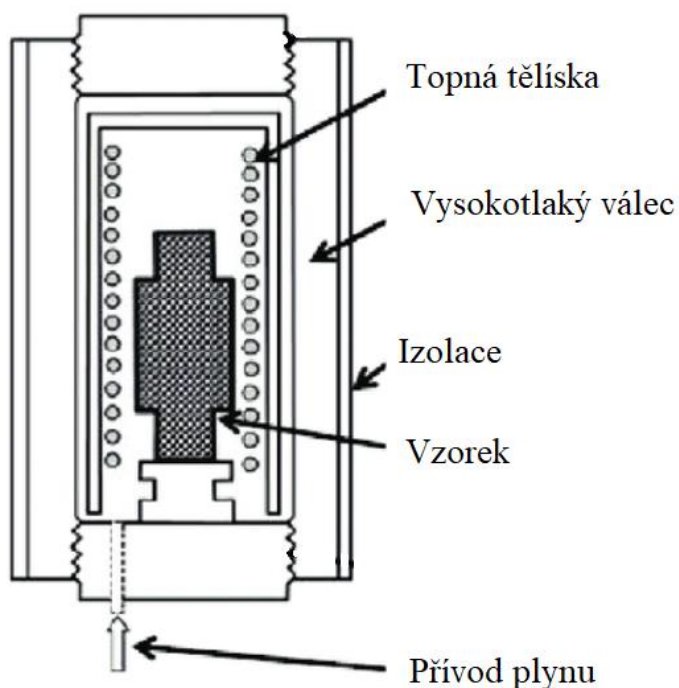
Hot Pressing - HP

Metoda horkého lisování spočívá na principu jednoosého lisování za zvýšené teploty (pro představu karbid křemíku je obvykle lisován za teploty okolo 2000 °C). [1] Pokud tedy použijeme tlak, jednotlivé částice se zdeformují a vyplní tak prázdná místa. Pomocí metody získáme výrobek s velmi nízkou porozitou. Lisování za tepla dovoluje lepší zhutnění, vyšší hustotu polotovaru a vyšší pevnost. [1]

Hot Isostatic Pressing - HIP

Metoda spočívá na podobném principu jako CIP. Tlak, který je zde používán se pohybuje v řádech desítek až stovek MPa a aplikovaným médiem je plyn. Na obr. 12 lze vidět topná tělíska obklopující slinovaný materiál. Využitý plyn je u této metody je většinou čistý argon, případně helium, oxid uhličitý, dusík či vodík. Jinou možností je užití směsi těchto plynů. Výrobek se smršťuje a zhušťuje, čímž dosahuje výsledné struktury s vysokou pevností. Nádoby

jsou vyrobeny z nerezové oceli. Metoda může být použita také bez využití tvarovací formy. V tom případě je polotovar nejprve zhutněn pomocí jiné tvarovací metody a poté slinut do fáze uzavřené pórovitosti. Vzorky s otevřenými póry nelze slinovat bez použití kapsle (obalu). [18] Nevýhodou je vysoká cena a časová náročnost.



Obr. 12: Schéma izostatického lisování [19]

2.5 Dokončovací operace

Dokončením vzorku je myšleno finální broušení a leštění. Tato akce může být poněkud komplikovaná, poněvadž finální vzorek je velmi křehký a tvrdý.

3 Teoretická část – osobní balistická ochrana

Balistika je věda o zákonitostech pohybu a účinku střel v daném prostředí. Zabývá se tedy jevy probíhajícími při výstřelu, během letu střely (kde dochází ke kontaktu se vzduchem) a účinky střely v cíli. Obecně lze říci, že studium balistiky vyžaduje znalosti matematiky, fyziky, aerodynamiky, hydromechaniky, termomechaniky a mnoha dalších. Zkoumání střely je možné rozdělit na čtyři další kategorie dle prostředí a za jakých podmínek se střela pohybuje.

Vnitřní balistika zkoumá pohyb projektilu v hlavní zbraně. Je to tedy doba od okamžiku zažehnutí zápalky až po okamžik opuštění hlavně. Další část balistiky se nazývá přechodová balistika. Tato oblast je vymezena okamžikem, kdy projektil opustí hlaveň a dobou konce urychlování střely pomocí plynů z hlavně. Třetí část balistiky se nazývá vnější balistika. Jedná se o část balistiky, která se zabývá dobou, kdy na střelu přestanou působit plyny z hlavně až po okamžik, než dopadne na cíl. Poslední podskupina se jmenuje terminální, někdy také koncová a je charakterizována od doby, kdy střela dopadne na cíl až po chvíli, kdy se veškerá její hmota (i úlomky) přestanou pohybovat. [20]

Jako balistická ochrana může být označeno cokoliv, co chrání před projektilem. Velkou mýlkou by se mohl jevit název „neprůstřelná vesta“ a „neprůstřelný materiál“. Tyto materiály nejsou neprůstřelné, jak by se mohlo na první pohled zdát. Materiály lze lépe nazvat „odolné“, poněvadž se snaží zabránit vniku projektilu a ochránit tak nositele, ale nejsou schopny zastavit veškeré druhy střel.

Z tohoto důvodu rozdělujeme osobní balistickou ochranu (neprůstřelné vesty) do několika stupňů neboli tříd balistické odolnosti (TBO). Třídy balistické odolnosti jsou vždy stanoveny konkrétní normou pro daný stát. Jako příklad lze uvést německou normu DIN 52290, britskou normu BS 5051 či ruskou GOST R50963-96. Velmi často užívaná je norma americká NIJ Standard-0101.04 a NIJ Standard-0101.06. Nelze opomenout českou normu ČSN 39 5360. U balistické odolnosti vůči střelám se vyhodnocuje účinek dané střely v ochranném prostředku a v podkladovém materiálu. Zjišťuje se rychlost střely, proniknutí projektilu ochranou (průstřel) nebo neproniknutí (neprůstřel), hloubka a objem vtisku. Nejrozšířenějším prostředkem ochrany lidského těla proti střelným, bodným či sečným zbraním a střepinovým účinkům je balisticky odolná vesta. Jako podkladový materiál se používá materiál s velmi podobnou tuhostí, jako má lidské tělo. [21]

ČSN 39 5360

Tato česká norma vznikla v roce 1996 na základě dlouholetých zkušeností. Norma byla nadčasová a mnoho zahraničních normalizačních institucí z ní převzalo určité pasáže. ČSN 39 5360 určuje požadavky na prostředky balistické ochrany proti střelným zbraním, bodným zbraním a střepinám. Je zde je rozlišováno sedm tříd balistické odolnosti (tab. 2). Norma také popisuje průběh zkoušek balistických materiálů a následné vyhodnocení. [22]

Tab. 2: ČSN 39 5360 [22]

ČSN 39 5360				
TBO	Ráže	Střela	Rychlost [m/s]	Hmotnost [g]
1	22LR	Pb/O	300 ± 10	2,6
2	9 mm Luger	CP/Pbj./O	410 ± 10	8
2CZ	7,62x25	CP/Pbj./O	470 ± 10	5,5
3	357 Magnum	CP/Pbj./KK	430 ± 10	10,2
3CZ	9 mm Luger	CP/Fej./O	440 ± 10	6,45
4	44 Magnum	CP/Pbj./KK	440 ± 10	15,6
4CZ	7,62x25	CP/Fej./O	550 ± 10	5,5
5	223 Rem	CP/Pbj.	920 ± 10	4
5CZ	7,62x39	CP/Fej.	710 ± 10	8
6	7,62x51	CP/Pbj.	830 ± 10	9,5
6CZ	223 Rem	CP/Fej.	820 ± 10	3,95
7	7,62x51	CP/Fej.	820 ± 10	9,8
7CZ	7,62x54R	CP/Fej.	860 ± 10	9,75
Vysvětlivky: CP - celoplášť, Pbj. - olovené jádro, Fej. - ocelové jádro O - ogivál ¹ , KK - komolý kužel				

V porovnání s americkou normou NIJ 0101.04 je komplexnější a přísnější. Obsahuje ráže užívané především v zemích bývalého východního bloku (AK-47 a jemu podobné). To může být výhoda, protože častěji narazí na protivníka s podobnou ráží (7,62x39 mm) než na protivníka s ráží 7,62x51 mm užívanou NATO. [23] U balistické zkoušky odolnosti vůči střepinám se zjišťuje mez balistické odolnosti vůči normované střepině. Tato mez balistické odolnosti je označována jako parametr V 50. Následně se vyhodnocuje rychlosti střepin, kdy projdou, a kdy nikoliv. Mezi zkoušky zabývající se odolností vůči bodným, sečným a úderným zbraním se řadí třídy odolnosti označované TON I-III. Ke každé je přiřazeno zkušební těleso – nože, koule a maloprůměrová tyč. Opět se posuzuje vniknutí zkušebního tělesa výrobkem a projev v podkladovém materiálu. [24]

NIJ STD 0101.06

Tato americká norma stanovuje minimální požadavky na odolnost vest a metody testování balistické odolnosti (tab. 3). Norma zahrnuje pouze balistickou odolnost proti střelným zbraním. Nezahrnuje odlišné druhy útoku, jako jsou zbraně bodné (nože). Problematika takového typu je řešena pomocí jiných norem. Norma NIJ STD 0101.06 nahradila již neplatnou normu na území USA NIJ STD 0101.04. Přesto se mnoho dalších zemí stále řídí starší normou NIJ STD 0101.04, protože je osvědčená a certifikace podle nové normy je pro firmy velice finančně nákladná. Nová norma je přísnější a byly do ní zavedeny životnostní testy, které zkoumají stupeň ochrany po umělém stárnutí materiálu. Dále do ní byla přidána zkouška ponoření. Původně stačilo vestu postříkat vodou, což se ukázalo jako nedostatečné. Dle nové normy musí vesta zastavit výkonnější střely než dle normy předcházející a zároveň zachovat

¹ Ogivál neboli ogivální tvar je speciální tvar špičky střely – řez ve směru osy náboje má tvar paraboly.

stejný maximální průhyb. To vede k nutnosti přidání dalších vrstev ochrany a tím ke zvýšení hmotnosti celé vesty. [25] [26]

Tab. 3: NIJ 0101.06 [25]

NIJ 0101.06						
TBO	Projektil	Ráže	Hmotnost [g] [g]	Min. rychlost [m/s]	Počet střel	Počet testů
II-A	1	9 mm FMJ RN	8	373	6	4
	2	40 S&W FMJ	11,7	325	6	4
II	1	9 mm FMJ RN	8	398	6	4
	2	357 Magnum JSP	10,2	436	6	4
III-A	1	.357 SIG FMJ FN	8,1	448	6	4
	2	44 Magnum SJHP	15,6	436	6	4
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9,6	847	6	2
IV	1	.30 Caliber M2 AP	10,8	878	1	2
FMJ - Celoplášťová střela (Full Metal Jacketed), JSP - Poloplášťová střela (Jacketed Soft Point), SJHP - Poloplášťová střela s dutou špičkou (Semi Jacketed Hollow Point) FMJ FN – Celoplášťová střela s plochou špičkou (Full Metal Jacketed Flat Nose), AP - Průbojná střela (Armor Piercing)						

Střelivo je označení nábojů do střelných zbraní. Je možné ho rozdělit dle druhu a ráže na malorážové střelivo – pro malorážové zbraně (do 20 mm), dělostřelecké střelivo pro dělostřelecké zbraně (kanóny, houfnice, minomety a raketomety) a ostatní střelivo, kam se řadí veškeré ostatní střelivo (signální střelivo, protitankové a protiletadlové střelivo). [27]

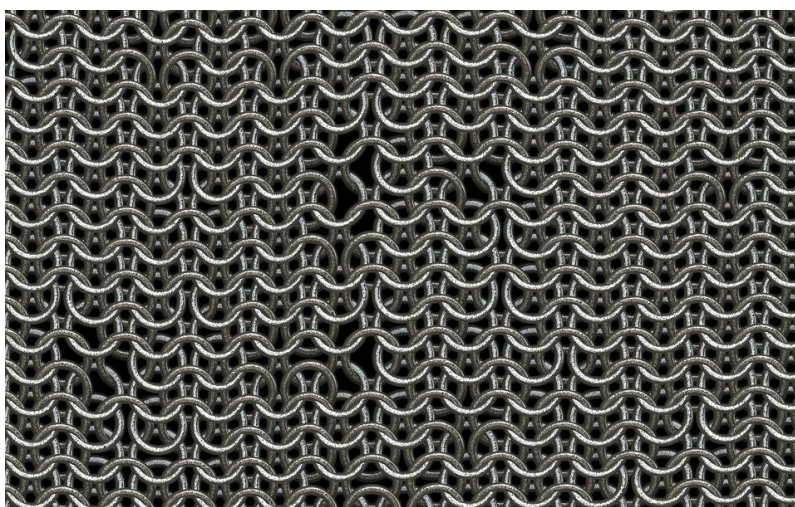
Malorážové střelivo se dále dělí podle velikosti, ráže a určení: mikrorážové, malorážkové, střední ráže, velkorážní, brokové, expanzní zbraně a přístroje a beznábojnicové. Mikrorážové střelivo je v posledních letech vývojovým trendem, především díky své nízké hmotnosti. Označení se obecně používá pro ráže 4,5-6 mm s hmotností 3-4 g. Střelivem střední ráže se označuje střelivo 6-9 mm. Velkorážní střelivo je pak střelivo 9-20 mm. [27]

3.1 Historie a vývoj

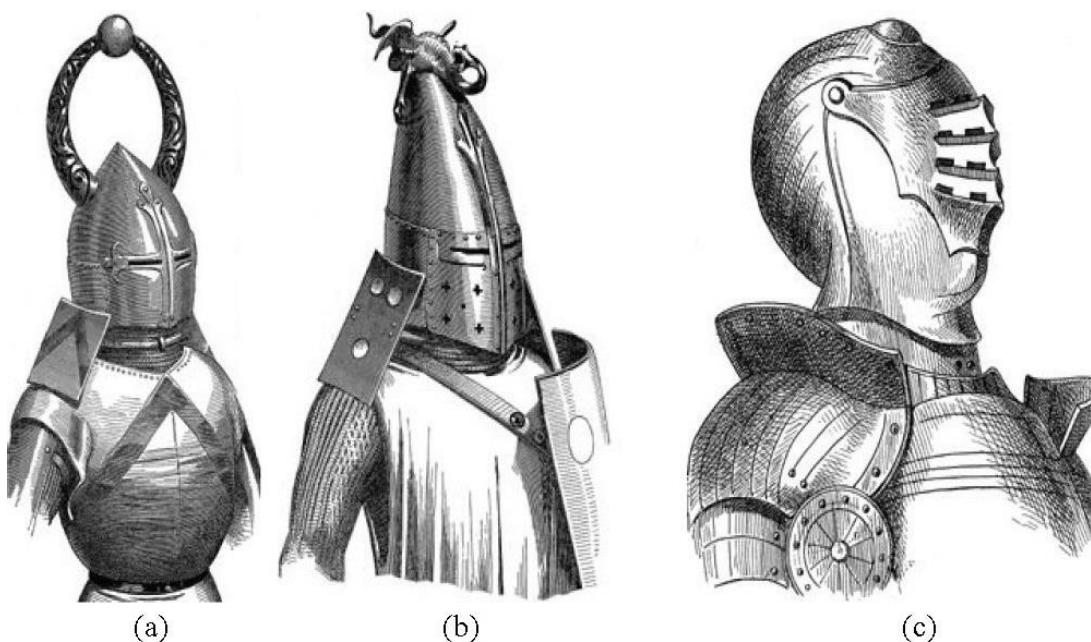
Zlepšování personální balistické ochrany je úzce spjato s historií konfliktů mezi lidmi a také s rozvojem zbraní. Za první zbraně lze považovat lidskou pěst či nohu, kámen nebo klacek. Z tohoto důvodu je možné datovat počátky osobní ochrany proti tupým předmětům, kousnutím, sekáním či bodnutím až k samému počátku lidstva. První ochranné prostředky byly vyrobeny

ze zvířecí kůže a srsti. Mongolové už ve 13. století př. n. l. používali právě kůži z hovězího dobytka jako personální ochranu. [28] V Číně se používala kůže z nosorožce jako výborný ochranný prostředek v 11. st. př. n. l. [29]. Kvůli zvýšení pohyblivosti a obratnosti válečníka se armády začaly zaměřovat na látkové zbroje vyrobené z hedvábí nebo lnu. Ve 4. století př. n. l., kdy většina armád používala jako ochranu trupu bronzový pancíř, Athénská armáda nahradila těžkou bronzovou zbroj lněnými korzetami. Tato lehká zbroj umožňovala větší pohyblivost a zároveň stejně kvalitní ochranu. Mezi roky 900-600 př. n. l. byly velmi oblíbené zbroje složené převážně z tkaniny a na ně přidělané kovové (bronzové) pláty nebo šupiny. [30]

Důležitým milníkem v inovaci zbroje byl vynález kroužkové zbroje (obr. 13), která se rozšířila především po Evropě v době středověku. Každý stát měl svoji obměnu kroužkové zbroje, ale základ byl stejný. Přestože primární účel zbroje byla ochrana, nemalý význam se v minulosti přikládal dekoraci jako reprezentaci svého postavení ve společnosti, které mohlo kupříkladu i nepřítele zastrašit (obr. 14).



Obr. 13: Kroužková zbroj



Obr. 14: Francouzská zbroj pocházející z 13. (a,b) a 14. století (c) [31]

Kromě Evropy je důležitý rozvoj Japonských zbrojí. Zde se ve 13. století rozlišovaly dva hlavní typy zbrojí: „yoroi“ – těžká, ozdobná a drahá zbroj určená pro samurajské jezdce. Druhý typ zbroje „do-maru“ – což byl jednoduchý oblek pro pěchotu. Oba typy byly zhotoveny z malých kovových plátů spojených koženými pásy. Vše bylo spojeno hedvábím. Postupem času (14. století) i samurajové (vysoce postavení válečníci) přešli na typ zbroje do-maru, protože vykazovala značně vyšší obratnost v souboji. V 16. století dosáhli výrobci japonského brnění vrcholu, když vyrobili oblek pro samuraje (obr. 15), který ho dokázal ochránit před šípy a čepelemi se zaručením dostatečné pohyblivosti.



Obr. 15: Samurajská zbroj z 18. století [32]

S vynálezem střelného prachu v Číně (7. - 9. století) je spjat i vynález palných zbraní. Doba vzniku palných zbraní není zcela zřejmá, ale datuje se do 13. či 14. století. S vývojem střelných zbraní se pojil i vývoj ochrany proti nim. Personální ochrana byla většinou vyrobena z kovu, čímž byla dána její vysoká hmotnost.

Evoluce personální ochrany lze tedy vysledovat v celé historii a její vývoj se vždy úzce pojil s vývojem zbraní a nových způsobů boje. Zbroj se tedy dále vylepšovala. Cíl byl zřejmý – snížit hmotnost celé zbroje za účelem zvýšení pohyblivosti vojáka a zvýšení jeho schopnosti bojovat. Během 14. a 15. století se používaly nejrůznější kovové pláty, ochrany hrudníku a žeber – především ocel. Tloušťka oceli se pohybovala okolo 1 až 2,5 mm, záleželo na druhu a potřebě obrany. Období 15. a 16. století n.l. je považováno za období, kdy se zbroje nejvíce zdobily dle postavení válečníka. Během 17. století se objevila velká potřeba zastavit letící projektil, a tak se vyráběly tlustší pláty. Avšak vždy byla zbroj příliš těžká, a proto velmi nešikovná pro válečníka v boji. Těžká zbroj válečníka značně zpomalovala a on se pak stal velmi snadným cílem. [30]

Během 19. století vzniklo mnoho pokusů o vytvoření účinné balisticky odolné personální ochrany. Roku 1879 jistý Ned Kelly z Austrálie vyrobil zbroj z železného šrotu. Zbroj pokrývala trup, vrchní část rukou a vrchní část nohou. I s helmou vážila zbroj 44 kg. Obrovská váha stála Kellyho život, poněvadž se ukázala jako neúčinná. Spodní část nohou byla nechráněna a při nízké rychlosti pohybu Neda Kellyho snadno zasažitelná. V 60. letech 19. století byla v Koreji vyvinuta první balistická vesta vyrobená z bavlny (obr. 16). Při použití dostatečného množství vrstev látky byla schopna zachytit kulku. [21]



Obr. 16: Korejská bavlněná zbroj [33]

Na počátku první světové války téměř žádná armáda nedisponovala jakýmkoliv ochranným prostředkem lidského těla. Až kvůli vysokým ztrátám na životech přinesla francouzská armáda ochranou helmu. První pokusy plátových brnění byly zavedeny pro piloty z důvodu neexistujícího opláštění letadel. Ale pro velmi sníženou pohyblivost se od tohoto pokusu upustilo.

V meziválečném období nebylo třeba vyrábět balistickou ochranu, protože pominula poptávka a její vývoj se tedy zpomalil. Druhou světovou válku lze považovat za další milník v personální balistické ochraně. Poprvé došlo ke změně směru myšlení, kdy se vědci zaměřili na otázku, jak efektivně ochránit vojáka. Pokrok v personální balistické ochraně přinesl Medical Research Council (MRC) Body Armor, který se skládal ze tří oddělených milimetrových ocelových plátů. Vše vážilo 1,1 kg a ochraňovalo srdce, plíce a další hlavní orgány. Ochrana byla vyrobena tak, aby nezabraňovala vojákovi v pohybu. Vesta dokázala odolat kalibru 0.38 (odpovídá 357 Magnum) na vzdálenost 4,5 metru. MRC představila svoji vestu Britské armádě v roce 1941. Zbroj zamezovala rychlému pohybu a i přesto, že zabránila smrtelným zraněním, projektil způsobil výrazné rány na těle. Největší průlom způsobily ochranné vesty zvané „flak jackets“ – protiflaková kombinéza pro piloty bombardérů (obr. 17). Tyto protistřepinové vesty vyrobené z nylonové tkaniny a kovových destiček dokázaly zastavit nepřátelské šrapnely. Flak jackets nebyly konstruovány na zastavení projektilu, ale i přesto je lze považovat za průlom ve výrobě balistických vest. Nasazení těchto vest bylo velmi úspěšné. [24]



Obr. 17: Flak jackets [24]

Během války v Koreji bylo pro americkou armádu vyrobeno několik nových typů vest zahrnující i typ M1951 (obr. 18). Tento typ vesty byl vyroben ze skelných vláken nebo hliníkových segmentů vetkaných do nylonové vesty.



Obr. 18: Vesta M1951 [34]

V průběhu války ve Vietnamu byly opět nasazeny výše zmiňované typy vest, tentokrát M1952A. Ovšem firma Natick Laboratories přišla s novou vestou v podobě keramického kompozitu. Anatomicky tvarované kompozity se začaly vyrábět jako monolit, nikoliv jako

spojení více segmentů. Pláty byly potaženy plastem. Vyráběly se ve třech variantách dle druhu použitého materiálu. Levnější a těžší Al_2O_3 a dražší, ale lehčí SiC a B_4C . Tyto vesty byly schopny zastavit ráži 0.30 (7,62 mm) ze vzdálenosti 91,55 m. I přes to byly nošeny spolu s vestou M1952A. [35]

Dalším nesmírně důležitým milníkem a důležitým vynálezem 20. století jsou syntetické tkaniny. V sedmdesátých letech byl firmou DuPontTM představen materiál pod obchodním názvem Kevlar® a měl ohromující vlastnosti. Po testování byly vesty začleněny mezi americké policejní složky a doporučeny pro běžné skryté nošení po celý den. Další inovací této vesty byla celokevlarová vesta s označením K-15, která se skládala z 15 vrstev kevlaru a obsahovala ocelovou desku umístěnou v oblasti srdce. Tento princip se využívá dodnes v podobě „trauma plates“ – antišokové pláty. Ve druhé polovině 80. let nosilo dle odhadů lehké vesty pro skryté nošení 30 – 50 % pochůzkářů. Dnes jsou vesty součástí běžné výstroje. Avšak i měkké kevlarové zbroje mají nedostatky, poněvadž úlomky, či projektily letící vysokou rychlostí zasáhnou vestu. Vesta není schopna absorbovat takové množství kinetické energie a střela tak způsobí smrtelné zranění v důsledku předání této energie. Od 70. let 20. století bylo vyvinuto mnoho nových vláken kromě Kevlaru®. Jsou to například Dyneema® od DSM, Goldflex® a Spectra® od Honeywell, Twaron® od Teijin, Dragon Skin od Pinnacle Armor či Zylon® od Toyobo. Tyto materiály jsou lehčí, tenčí, odolnější a v neposlední řadě také dražší než zmiňovaný Kevlar®. [24]

V současné době je běžným postupem vkládání ocelových, keramických či jiných plátů do kapes (nosníků) umístěných na vestě. V případě zásahu či jiného poškození jsou pak tyto pláty snadno vyměnitelné. Moderní vojenské vesty začínají na hmotnosti kolem 6 kg v případě, že jsou vybaveny pouze měkkou balistickou vložkou bez vložených tvrdých ochranných plátů. Při vložení tvrdých plátů dosahuje hmotnost až 11 kg. Takto vybavené vesty se používají tam, kde je vysoké riziko střelby z pušek a samopalů (nepostačí běžná měkká vložka).



Obr. 19: Nosič panelů RAPTOR 2.0 [36]

3.2 Současný stav poznání

Ochrana (brnění) vojáka (bojovníka) je jednou ze tří nepostradatelných věcí na bitevním poli. Spolu s možností pohybovat se (rychlostí) a palebnou silou tvoří základní pilíře úspěšné mise.

Hlavní funkcí osobní balistické ochrany – „neprůstřelné vesty“ je zabránit průniku letícího projektilu do tkáně. Již dříve zmíněné normy balistické ochrany/odolnosti počítají i s druhou funkcí vesty, a to alespoň částečně pohltit kinetickou energii střely a rozložit ji do větší plochy. [37] I když je tedy balistická ochrana schopna zastavit střelu, deformace vesty vzniklá v důsledku rázu může být příliš velká a způsobit přesto vážná až smrtelná vnitřní zranění. [38]

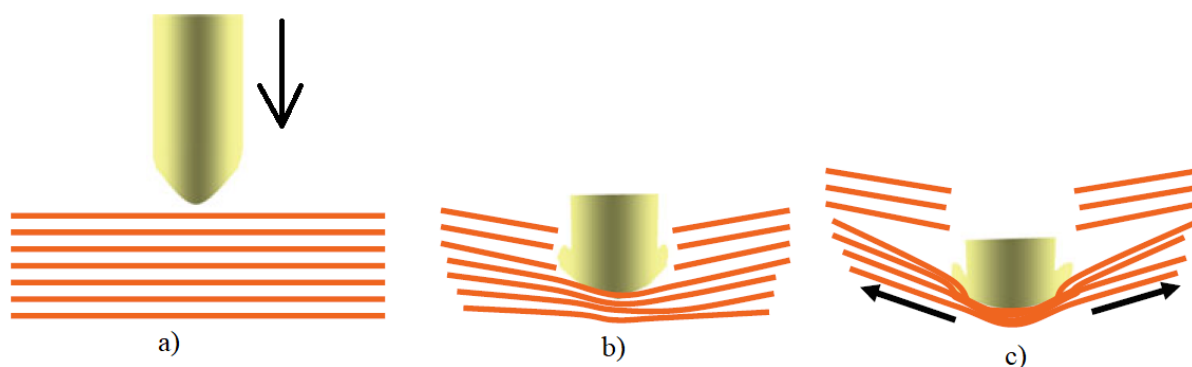
3.3 Složení balistické ochrany

Neprůstřelné vesty se skládají z balistického nosiče, který obsahuje tři části – měkké balistické desky, tvrdé desky a pohlcovače rázu tzv. antišokové vložky. Úlohou měkké a tvrdé desky je zastavit letící střelu. Desky jsou vyrobeny z nejrozličnějších materiálů odvíjejících se od požadavků na ochranu. Měkké balistické desky jsou součástí všech vest, zatímco tvrdé pláty jsou tzv. „přídavné“ – zvyšují schopnost zabránit průniku střely. Úlohou pohlcovače rázu je absorbovat kinetickou energii střely a předat ji balistickým deskám. Druhou funkcí je snížit prohnutí (deformaci) vesty. [38]

Při používání vesty v teplých krajinách může docházet k přehřívání a velkému vzniku tepla – vyšší námaha, nízký komfort pro uživatele. Proto je kladen i velký důraz na design vesty a odvod tepla. [39] [40] Každá vesta je určena pro konkrétní použití. Nelze obecně říci, že ten či onen materiál je nejvhodnější pro daný stupeň balistické ochrany. Vždy je potřeba rozhodovat na základě kombinace fyzikálních a mechanických vlastností a konkrétní situaci. [38][41]

3.3.1 Měkká vrstva

Vložka vytvořená z měkké vrstvy je určena pouze pro zastavení projektilu s měkkým jádrem (tj. běžná munice s olověnou kulkou). Vláknata použita v této části balistické vesty mají vysokou mez napětí v tahu, ale nízkou mez napětí ve střihu. Proto je použito obrovské množství napnutých vláken – vyšší pevnost. Samostatný panel lze přirovnat k síti s malými oky, která zastaví letící projektil deformací sebe sama. První vrstvy nejsou schopny kulku zastavit, protože jsou namáhané na střih. Vzniká v nich odpor proti rychlosti nedostatečný na to, aby kulku zastavil, avšak dostatečný na to, aby ji zdeformoval (obr. 20a). Deformace kulky s každou další vrstvou, kterou projektil projde, zvětšuje její přední plochu, kterou naráží do dalších vrstev (obr. 20b). Díky zvětšení čelní plochy jsou pak další vrstvy schopny kulku zastavit (obr. 20c). [38] Prvním používaným materiálem byl nylon. S nástupem kevlaru došlo ke zlepšení účinnosti vest a k většímu rozmachu těchto syntetických materiálů pro balistickou ochranu. Dnes se měkká vlákna dělí na aramidy (Kevlar®), polyethylenová vlákna (Dyneema®), polypropylenová vlákna, skelná vlákna, uhlíková vlákna a Zylon®. [42]

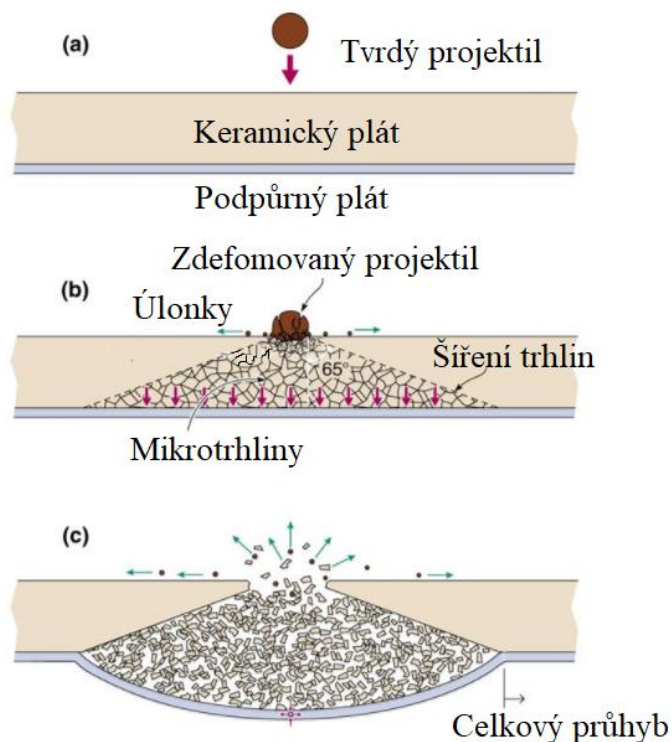


Obr. 20: Průběh zastavení letícího projektilu pomocí vláken [38]

3.3.2 Tvrdá vrstva

Pevné vložky tvrdé vrstvy jsou ve vestě integrované nebo je lze do balistického nosiče přidat dodatečně. [43] Vložky lze rozdělit na ocelové pancíře, pancíře z hliníkových nebo titanových slitin a nekovové pancíře. Odolnost tvrdé vložky proti průniku projektilu je dána tloušťkou, tvrdostí a houževnatostí. Ocelové pancíře bývají vzhledem ke svému vysokému měrnému objemu velmi těžké, a tak je u nich snaha minimalizovat jejich tloušťku. Toho lze dosáhnout zvýšením tvrdosti bez snížení potřebné houževnatosti takovýchto pancířů. [43] [44] Mezi výhody ocelových plátů se řadí relativně nízká pořizovací cena, dlouhá životnost a také fakt, že vydrží hrubé zacházení (pády na zem). Jako hlavní nevýhodu lze uvést vysokou hmotnost ve srovnání s keramikou, a proto se od ocelových pancířů v osobní ochraně postupně upustilo a přešlo se k nekovovým kompozitním (keramicko-polymerním) vložkám. Do nekovových tvrdých pancířů řadíme lamináty a keramiku. V případě laminátů jde o kombinaci skelných, aramidových, polyetylenových a uhlíkových vláken. Kompozity jsou schopné absorbovat velké množství energie, ale proti tvrdým projektilům jsou neúčinné. Nedojde k otupení čela projektilu jako u měkkých projektilů. [42] Proti tvrdým průbojným střelám (Armor piercing – AP munice) se dnes využívají převážně pokročilé keramické materiály. Střela narážející do tvrdé keramiky se otupí (roztříští / zdeformuje) a vychýlí. Energie letící střely je částečně pohlcena drcením keramické vrstvy (tvorbou prasklin/lomů) (obr. 21). Z energetického hlediska je kinetická energie střely částečně přeměněna na tvorbu nových rozhraní (povrchů) keramika-vzduch. To

je hlavní rozdíl mezi keramikou a kovovými pláty, které energii projektilu pohlcují převážně plastickou deformací (díky tomu, že jsou i při vysokých rychlostech střely stále tvárné). Samotná keramika není vhodná kvůli své nízké houževnatosti a nízké pevnosti v tahu a ohybu. Keramika má teoreticky větší pevnost v tahu i v ohybu, ale vyznačuje se vysokou vrubovou citlivostí, což má za následek křehké porušení před dosažením těchto vysokých teoretických hodnot. Využívá se tak přídatných podkladových / anti-šokových vrstev. [42][44]



Obr. 21: Schéma průběhu zastavení letícího projektilu pomocí keramického a podpurného plátu [45]

3.3.3 Antišoková vrstva – tlumič rázu

Tyto vrstvy se skládají z balistických laminátů, kovů či jiných materiálů využívaných i u měkkých vrstev. Primárně slouží k zachycení střepin roztrženého projektilu (a keramiky) a v případě zásahu mechanicky podporuje horní tvrdou vrstvu a umožňuje tak dostatečnou ochranu i v případě dopadu dalšího projektilu (multi-hit). Tyto aditivní vrstvy pak mají významný vliv i pro minimalizaci vnitřních traumat zasažené osoby tím, že energii dopadu rozprostře do ještě větší plochy a sníží tím lokální deformaci vesty.

3.4 Materiály pro osobní balistickou ochranu

K balistické ochraně slouží balistické ochranné panely. Tyto panely mohou být již přímo všity ve vestě, případně se mohou vkládat do kapes a být tak snadněji vyměnitelné. Vyměnitelnost balistických panelů se hodí v případě poškození, ale i v případě změny účelu – použití balistické vesty v jiném prostředí. Například městský strážník na běžné pochůzce nebude pravděpodobně nosit balistickou vestu s vložkou se stejně vysokou úrovní ochrany jako voják při misi.

3.4.1 Měkké materiály

Mezi balisticky měkké materiály se jako jeden z prvních zařadil nylon (tkanina ze zvlákněného syntetického termoplastického polymeru), který byl prvním komerčně úspěšným předchůdcem moderních balistických materiálů. S příchodem Kevlaru® došlo k výraznému zlepšení odolnosti balistických vest a podnítil další výzkum v této oblasti.

Aramidy

Tyto materiály jsou vyrobeny z aromatických polyamidů. Vlákná se skládají z dlouhých řetězců uhlovodíků. Do kategorie lze řadit Kevlar®, Nomex®, Artec® či Twaron®. [42]

Kevlar®

Materiál byl vyvinut v roce 1971 firmou DuPont™ s původní plánem nahradit ocel ve výztuhách pneumatiky. Po zjištění vlastností se využitelnost rozšířila u letounů, raketoplánů, sportu i balistických vest. Mezi výhody lze zařadit nevodivost, odolnost vůči odření, teplu a organickým rozpouštědlům, vysokou pevnost a pružnost. Jako nevýhody je možné jmenovat citlivost na ultrafialové záření, vlhkost a salinitu. Vlákná má pevnost v tahu okolo 3000 MPa a hustotu 1,44 g/cm³. Kevlar® je tedy cca. pětikrát pevnější v tahu než ocel při stejné váze a je flexibilní. [42]

Twaron®

Twaron® je velmi pevný a lehký materiál vyvinutý firmou Teijin Aramid v roce 1986 složený z para-aramidového vlákna. Má velmi podobné vlastnosti jako kevlar a je proto používán v podobných aplikacích. [42]

Polyethylenová vlákna

Tato vlákna jsou vyrobena z polyethylenu s vysokou molekulární hmotností řetězce spojeného s ostatními pomocí Van der Waalsových vazeb. Vlákná se vyznačují vysokým modulem pružnosti. Mezi tyto materiály řadíme vlákna Dyneema® či Spectra®. [42][44]

Dyneema®

Toto pevné polyethylenové vlákno vyvinuté firmou DSM v roce 1979 disponuje až desetinásobně větší pevností oproti oceli vztaheně k měrné hmotnosti. Je odolné vůči korozi, chemikáliím, kyselinám, má vysokou odolnost proti nárazu. Vyniká i vysokou absorpcí energie a je tak vhodný kandidát pro balisticky odolné materiály. Pevnost vláken dosahuje až 2,4 GPa s hustotou 0,97 g/cm³. Poměr pevnosti k hmotnosti je o 40 % vyšší než u aramidových vláken. Mezi nevýhody se řadí nízká odolnost vůči vyšším teplotám (80-100 °C), kde při delším vystavení dochází k degradaci materiálu. Z tohoto důvodu se při výrobě balisticky odolných materiálů kombinují s aramidovými vlákny. Při kombinaci tak vzniká materiál s dobrou tepelnou odolností, nízkou měrnou hmotností, vysokou pevností a nízkou hodnotou trauma efektu. [42]

Polypropylenová vlákna

Do skupiny řadíme vlákno s názvem Innegra S® od společnosti Innegrit, LLC. Vlákná tvoří orientovaný polypropylen. Vlákná disponují nízkým bodem tání, dobrými dielektrickými vlastnostmi, odolností vůči chemickým materiálům. V balistické ochraně se uplatňují společně s aramidovými, skelnými či uhlíkovými vlákny. [42]

Skelná vlákna

Jedná se o vlákna tažená z taveniny skla s průměrem 3,5 až 24 μm s kruhovým průřezem. Existuje více druhů skelných vláken s nejrůznějšími vlastnostmi. Mezi hlavní výhody se řadí vysoká pevnost (okolo 3 GPa, záleží na druhu skelného vlákna), elektrická nevodivost či odolnost proti ohni. Mezi nevýhody se řadí degradace pevnosti při působení vlhkosti a nízká odolnost při trvalém namáhání. Obvykle se skládají z SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , B_2O_3 a K_2O . [42]

Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna se vyznačují vysokou pevností a tuhostí, ale vyšší křehkostí než kupříkladu skelná vlákna. Vlákna nepodléhají korozi, jsou anizotropní a disponují odolností vůči dlouhodobému namáhání. Kvůli vysoké křehkosti a lámavosti se povrchově upravují epoxidovou pryskyřicí. Průměr vláken je okolo 5-10 μm . Vlákna jsou tvořena z atomů uhlíku s šesterečnou mřížkou spojené v krystaly. V současné době se vlákna vyrábí z polyakrylonitrilu. Pevnost vláken opět záleží na konkrétním typu, avšak pohybuje se okolo 3,5 GPa. [42]

Zylon®

Toto vlákno vzniklo v roce 1998 pod vedením japonské firmy Toyobo. Vlákno má téměř dvakrát vyšší pevnost v tahu než vlákna para-aramidová. Značí se vysokou teplotní odolností, ale naopak je velmi náchylné na dopad slunečního záření. Z tohoto důvodu musí být chráněno jinými krycími materiály. [42] Pevnost je okolo 5,8 GPa. [46]

3.4.2 Tvrdé materiály

Za tvrdé materiály se považují vložky, které jsou zabudované přímo v balistické vestě nebo je lze přidat dle potřeby do balistického nosiče. Tvrdé vložky je možné rozdělit na nekovové slitiny (keramické materiály a lamináty), oceli a pancíře z titanových či hliníkových slitin.

Oceli

Ocelové pancíře se již dlouho používají jako balisticky odolný materiál, který vyniká svoji mechanickou odolností a relativně snadnou dostupností. Dostupnost oceli a tím pádem i její cena je důvod, proč je ocel stále využívána. Obrovskou nevýhodou oceli je vysoká měrná hmotnost, která je ve srovnání s keramikou značně vyšší. Ocel o relativně vysoké materiálové hustotě dokáže zastavit projektily s tvrdým jádrem o vysoké rychlosti. Ocelový plát absorbuje veškerou kinetickou energii střely a střela se roztrhne. Plát se v důsledku nárazu prohne – přemění kinetickou energii na plastickou deformaci, energii pružného odrazu střepin a teplo (v závislosti na druhu materiálu projektilu). Velikost prohnutí záleží na tloušťce plátu, kvalitě plátu a mnoha dalších faktorech. Při roztržení střely může dojít k sekundárním zraněním v důsledku letících úlomků samotné střely. Tyto úlomky letící vysokou rychlostí pak mohou zasáhnout nechráněné části těla (krk, končetiny). Z tohoto důvodu je ocelový plát pokryt polymerem, který slouží k zachycení právě těchto úlomků. [47]

Nejpoužívanější ocelí je Armox od švédské ocelářské skupiny SSAB. Pláty mohou být užity bez měkké balistické ochrany, ovšem v tomto případě samy neplní ochranou funkci proti střepinám a bodným zraněním. Výhodou oproti keramickým plátům je lepší multi-hit (výdrž několika zásahů do jednoho místa). Jako další výhodu lze jmenovat výdrž při hrubém zacházení – déšť, slaná voda (v případě antikorozi úpravy) a téměř neomezená životnost. [47]

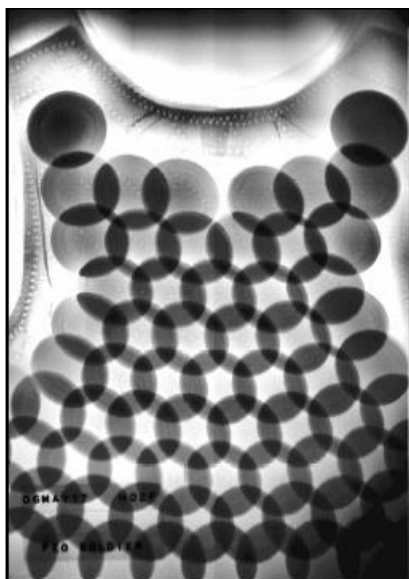
Slitiny hliníku a titanu

Největší výhodou hliníkových pancířů je třetinová hustota oproti ocelovým. Odolnost slitiny 5083 s pevností 350 MPa je při použití průbojných střel u stejně těžkých ocelových pancířů nižší. Proti standartním projektilům je odolnost srovnatelná. Slitina typu 7039 s pevností 500 MPa má téměř stejnou odolnost proti průbojným střelám jako ocelový pancíř. Slitiny titanu vykazují lepší multi-hit. Jejich nevýhodou je však vyšší plošná hmotnost a vysoká cena. Jsou korozivzdorné, a to i vůči slané vodě. [42]

Keramika

Keramika se pro balistickou ochranu začala vyvíjet už v 70. letech 20. století v USA (ve válce ve Vietnamu). Prvotní záměr byl použít tuto keramiku do neprůstřelných vest a sedadel helikoptér s cílem zastavit střelu při nižší hmotnosti použitého balisticky odolného materiálu. Rozdíl je i ve způsobu absorpce kinetické energie střely. Kovy pohltnou energii, a přitom se plasticky deformují, zatímco keramika rozptýlí energii skrze vytvoření menších úlomků (rozpadne se). Schopnost keramiky odolat projektilu je dána jejími fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. [48]

Keramické materiály patří díky iontově-kovalentní vazbě k nejtvrdějším materiálům, co známe. S její tvrdostí se však také pojí její křehkost. Keramické pláty mají horší výsledky balistické odolnosti při vícenásobném zásahu (multi-hitu) než kovové pancíře a jsou náchylné k mechanickému poškození (například vlivem pádu na zem). Tyto problémy jsou částečně řešeny u kompozitních balistických vložek, kde je keramika nanesena na měkký balistický materiál (například aramid). Nesmírnou výhodou keramických plátů je poloviční měrná hmotnost oproti ocelovým plátům. Problém rozlomení keramických plátů lze také řešit složením balisticky odolné vesty z několika malých keramických dílů. Takto je řešena například balistická vesta s názvem Dragon skin (obr. 22). Ta obsahuje množství keramických disků zalitých v ohebné polymerní hmotě. Při zásahu dojde ke zničení malého počtu disků a zbytek vesty tak zůstane plně funkční.



Obr. 22: Rentgenový snímek vesty Dragon skin [49]

V tab. 4 jsou uvedeny základní vlastnosti tří materiálů, ze kterých se nejvíce vyrábí balisticky odolné vesty.

Tab. 4: Základní vlastnosti vybraných druhů keramiky [50]

Druh keramiky	Hustota [g/cm ³]	Tvrdost [Gpa]	Modul pružnosti [Gpa]
Al ₂ O ₃	3,99	25	400
SiC	3,21	30	438
B ₄ C	2,52	49,5	483

Jak lze vidět v tabulce 4, karbid bóru a křemíku vykazují lepší vlastnosti než oxid hlinitý. Oxid hlinitý je však značně dostupnější a levnější. Z tohoto důvodu je právě oxid hlinitý velmi rozšířený ve výrobě balisticky odolného materiálu pro pozemní techniku. Na druhou stranu karbid boru se užívá spíše pro personální balistickou ochranu a pro helikoptéry pro své výrazně nižší měrnou hmotnost. [50]

3.5 Materiály budoucnosti

Jelikož zbrojní průmysl uvádí každý rok na trh zbraně s vyšší průrazností a dalšími lepšími vlastnostmi jak u zbraní samotných, tak použitého střeliva, je potřeba, aby se i vývojáři balisticky odolného materiálu se posunovali stále dopředu. V současné době je věnována velká pozornost právě již zmíněným keramickým materiálům. Na trhu jsou i další materiály, od kterých se dá čekat, že budou znamenat průlom v balisticky odolných materiálech a stanou se možná opravdu „neprůstřelnými“ pro současné ruční palné zbraně. Jako materiály budoucnosti, které jsou v současné době ve stálém vývoji, lze jmenovat: pavoučí a chitinová vlákna, tekutá balistika, grafen, tensylon či uhlíkové nanotrubičky. Materiály jsou nesmírně pevné a vykazují několikanásobně lepší vlastnosti než dosud užívané materiály. Ve své práci se zaměřím alespoň na dva z výše zmíněných materiálů. [21] [42]

3.5.1 Pavoučí a chitinová vlákna

Tyto vlákna mají vysokou průtažnost a extrémní pevnost v poměru ke svým rozměrům. Průměr vláken se pohybuje v rozmezí 0,15-0,02 μm . Oproti nylonu, který má průtažnost 20 %, vydrží pavoučí vlákno dvojnásobek. Oproti kevlaru je vlákno třikrát pevnější. Hlavní složkou vlákna je látka fibroin, který se tvoří ve žlázách pavouka. Vědci umějí vlákno vyrobit, ale postup je velmi náročný. Pro výrobu lze použít geneticky upravené housenky bource morušového. Přírodní materiál chitin by mohl v budoucnu také tvořit součást balistických vest z důvodu své vysoké pevnosti. Problém je, že tyto vlákna nelze vyrábět průmyslově z důvodu náročného procesu výroby. [21] [51] [52]

3.5.2 Tekutá balistika

Princip fungování tekuté balistiky je poměrně prostý. Již používané materiály se namočí do speciální kapaliny, která má odlišné vlastnosti než obecně známé kapaliny (Nenewtonské kapaliny). Při rychlém vniknutí kapalina téměř okamžitě ztuhne a ztvrdne. Po pohlcení energie se opět vrátí do původního stavu. Do kapaliny lze namáčet kupříkladu kevlarová vlákna.

Další způsob ochrany pomocí kapaliny je využití oleje obsahujícího miniaturní částičky železa. Tyto částičky reagují na magnetické pole. Pokud je tedy uživatel v ohrožení, zapne magnetické pole, částičky ztvrdnou a nepustí letící projektil. Po vypnutí se vesta stává opět měkká a uživatel je více mobilní. [53] [54] [55]

3.6 Shrnutí balistické ochrany

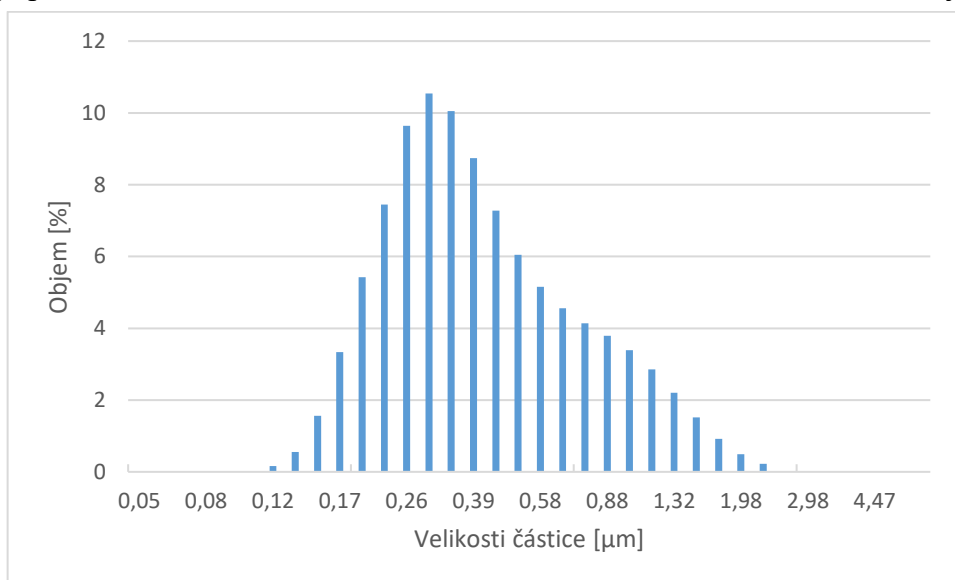
V současné době se při výrobě balistických vest nejvíce užívá kombinace výše zmíněných materiálů. Kombinací tvrdých panelů, měkkých vložek a protišokové vrstvy lze dosáhnout vysoké ochrany proti většině ručních protipěchotních zbraní. Je nevyvratitelné, že balisticky odolné materiály budou potřeba, dokud budou potřeba zbraně. A čím účinnější zbraně budou, tím lepší musí být ochrana sama. I když je nošení balistické vesty mnohdy nepohodlné, dokáže zachránit lidský život. Je možné, že jednou bude balistická zbroj součástí každodenního života nás všech. Jak bude taková zbroj vypadat, je ve hvězdách.

4 Experimentální část

Provedené experimenty byly navrženy tak, aby mohla být studována závislost dosažené relativní hustoty vylisovaných a následně slinutých těles na třech parametrech procesu uniaxiálního lisování a to 1) lisovacím tlaku, 2) výdrže (prodlevě) na lisovacím tlaku a 3) ekvivalentu rychlosti náběhu lisovacího tlaku. Všechny experimenty byly provedeny s komerčně dostupným práškovým Al_2O_3 materiálem.

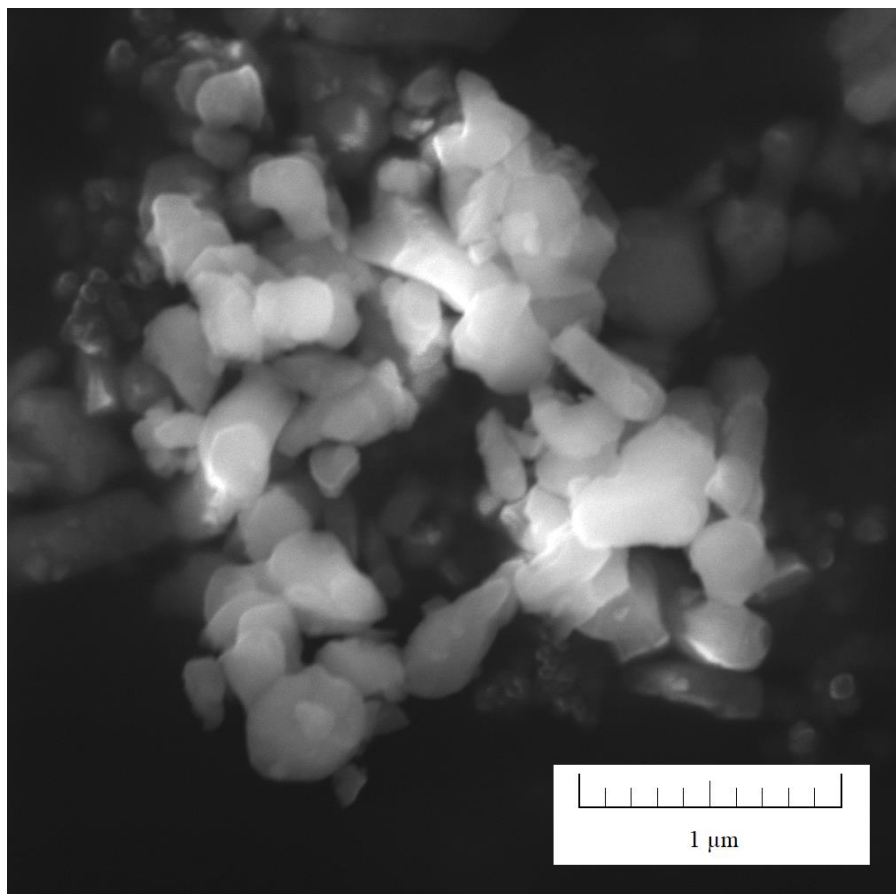
4.1 Práškový materiál

Pro experiment byl použit práškový materiál s označením SUMITO AES – 11C α Al_2O_3 od firmy Sumitomo chemical. Použitý práškový materiál má průměrnou velikost částic $0,3\ \mu\text{m}$ (obr. 24) a čistotu 99,8 % Al_2O_3 (hodnoty udávané výrobcem). Na obrázku 23 je znázorněna objemová distribuce velikosti částic získané pomocí metody laserové difrakce. Přístroj pro měření byl použit Horiba LA-950 Laser Diffraction Particle Size Distribution Analyzer.



Obr. 23: Objemová distribuce rozložení částic získaná z laserové difrakce

Sledování morfologických charakteristik vzorků bylo prováděno pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) na přístroji Philips XL30 (Holandsko). Na přístroji byly zhotoveny snímky leštěných vzorků a vyleptaných vzorků. Na obr. 24 lze pozorovat morfologii a velikost částic prášku.



Obr. 24: Snímek zrn použitého prášku

4.2 Uniaxiální lisování

Výše zmíněný keramický práškový materiál byl vylisován uniaxiálním tlakem 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100 a 150 MPa s prodlevou na maximálním tlaku 60 s v ocelových formách o průměrech 12, 16, 24, 30 a 50 mm. Pro lisování byl použit laboratorní polo-automatický hydraulický lis BSML 21 od firmy BRIO Hranice. Lis je schopný vyvinout lisovací sílu až 250 kN. První byly vždy vylisovány vzorky tlakem 10 MPa s takovým množstvím prášku, aby výsledný poměr výšky vůči průměru vzorku dosahoval hodnoty 0,3. Ostatní vzorky o stejném průměru byly lisovány se stejným množstvím prášku. Síla nutná k dosažení potřebného lisovacího tlaku byla stanovena dle rovnice

$$F = P \cdot S = P \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} [N], \quad (2)$$

kde F je výsledná síla v newtonech, P je působící tlak v pascálech, S je plocha podstavy vzorku v metrech a d je průměr podstavy vzorku v metrech.

Doba výdrže na lisovacím tlaku byla pro experimenty zjišťující vliv lisovacího tlaku stanovena na 60 sekund. Hodnota ekvivalentu rychlosti náběhu lisovací síly byla nastavena na hodnotu 10 %.

U experimentů, které měly zjistit vliv výdrže na lisovacím tlaku, byly zvoleny lisovací tlaky 10, 15, 20 a 30 MPa, ekvivalent rychlosti 10 %, forma průměru 16 mm a lisovací časy 1 minuta, 2 minuty, 5 minut a 15 minut.

U experimentů studujících vliv ekvivalentu rychlosti náběhu na lisovací tlak (sílu) byly zvoleny tlaky 10 a 50 MPa u průměru formy 16 mm a doba výdrže na lisovacím tlaku 60 s. Při každé změně parametru byly vždy vylisovány tři vzorky.

Forma byla před každým lisovacím cyklem důkladně očištěna a stykové plochy natřeny nasyceným roztokem etanolu a polyvinil alkoholu (PVA) a to ve dvou vrstvách. Lubrikant měl za úkol snížit tření mezi keramickým práškem a stěnou formy, a tím i snadnější vyjmutí výlisku z formy. Potřebné množství navážky bylo odměřeno na digitální váze KERN PCB 1000-2 s přesností na 0,01 g. Spodní (kratší) píst byl zasunut do vnitřku formy a keramický prášek (Al_2O_3) byl opatrně nasypán do prostoru formy. Forma byla následně uzavřena vrchním (delším) pístem. Oba písty byly vloženy do těla formy tak, aby byl během lisování umožněn pohyb obou pístů směrem k sobě (uniaxiální lisování se dvěma volnými písty). Následně byla forma vložena do lisu a stlačena příslušnou silou. Po skončení lisování byla forma vyndána z lisu a převrácena. Spodní (kratší) píst byl jemným krouživým pohybem vysunut a pomocí horního (delšího) pístu byl vzorek vylisován (střed formy zatlačen dolů). Při vyšších tlacích (nad 50 MPa) bylo nutné vylisovat vzorek společně s kratším pístem, kvůli vysokému podtlaku. Po odebrání výlisku (green body) byla změřena výška vzorku. Výška vzorku byla změřena posuvným měřidlem s přesností na 0,01 mm. Relativní hustoty po lisování pak byly stanoveny geometricky (výpočtem z vnějších rozměrů a hmotnosti). Vypočtené hodnoty pro dané tři vzorky se stejnými vstupními parametry byly následně zprůměrovány a vyneseny ve výsledných grafech s příslušnou chybou.

4.3 Slinování

Všechny vylisované vzorky byly slinovány stejným teplotním cyklem. Z pokojové teploty teplota rostla rychlostí 10 °C/min až na teplotu 700 °C, po-té se rychlost ohřevu zpomalila na 3 °C/min, a to až na teplotu 1550 °C. Zde probíhala výdrž na teplotě po dobu 120 minut. Následně se teplota opět snižovala a to o 2 °C/min za minutu na teplotu 400 °C. Následovalo pomalé volné chlazení v uzavřené peci.

4.4 Měření hustoty

Relativní hustota byla zjišťována Archimedovou metodou dle normy ČSN EN 623-2. Hmotnosti vzorků byly zjišťovány na analytických vahách Mettler Toledo. Vzorky byly sušeny pod infračervenou lampou ($T \approx 150$ °C) po dobu nejméně 60 min. Následně byla zjištěna tzv. suchá hmotnost (m_s) na analytických vahách s přesností 0,0001 g. Vzorky byly následně vloženy do vakuové komory, kdy byly vzorky po dobu 30 min udržovány při tlaku cca 20-30 mbar a poté byly zatopeny deionizovanou vodou s malým množstvím smáčedla. Po další půl hodině vakuování byla komora zavzdušněna a vzorky byly ponechány min. dalších 30 min. na vzduchu za normálního (atmosferického) tlaku. Po tomto postupu by měly vzorky být nasáklé vodou (pokud mají otevřenou pórovitost). Následně byla změřena tzv. Archimedova hmotnost (m_{Arch}) pod hladinou vody a po osušení filtračním papírem byla změřena ještě hmotnost nasáknutého vzorku (m_{nas}) na vzduchu. Všechny tři hmotnosti byly zapsány do tabulky a z nich zjištěna relativní hustota, absolutní hustota, otevřená a uzavřená porozita. Měření všech hmotností vzorků proběhlo vždy minimálně dvakrát a výsledné hodnoty byly zprůměrovány. Výpočet relativní hustoty je uveden v rovnici (3). Ve výpočtech je užita hodnota teoretické hustoty Al_2O_3 3,99 g/cm³. [56]

$$\rho_{rel} = \frac{m_s}{m_{nas} - m_{Arch}} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_{teor}} \cdot 100 [\%], \quad (3)$$

kde ρ_{rel} je relativní hustota v procentech, m_s je suchá hmotnost v gramech, m_{Arch} je Archimedova hmotnost v gramech, m_{nas} je hmotnost nasáknutého vzorku v gramech, ρ_w je hustota vody v g/cm³ a ρ_{teor} je teoretická hustota v g/cm³.

Relativní otevřená a uzavřená porozita byla vypočítána z rovnic (4) a (5).

$$V_{Orel} = \frac{m_{nas} - m_s}{m_{nas} - m_{Arch}} \cdot 100 [\%], \quad (4)$$

kde V_{Orel} je relativní otevřená porozita v procentech.

$$V_{Urel} = \frac{m_{nas} - m_{Arch}}{m_{nas} - m_{Arch}} \cdot 100 - \rho_{rel} [\%], \quad (5)$$

kde V_{Urel} je relativní uzavřená porozita v procentech.

4.5 Měření tvrdosti

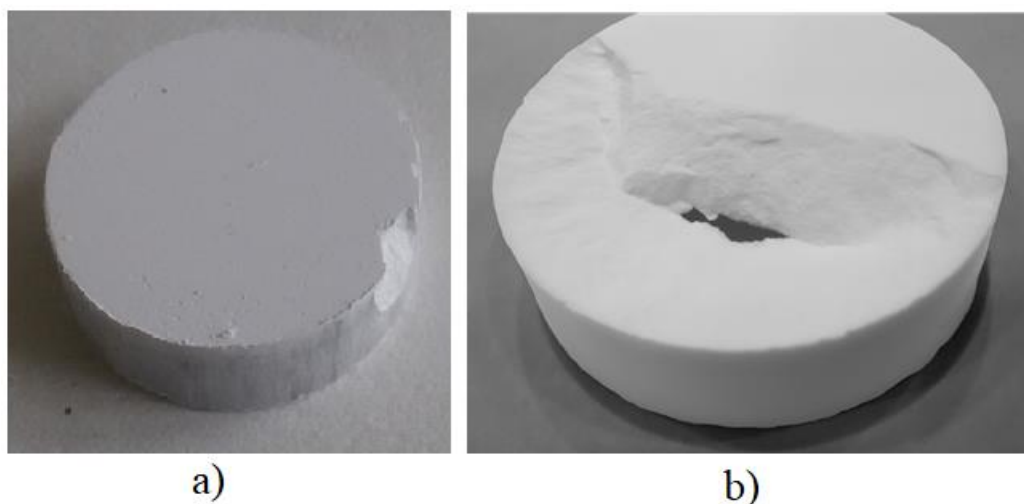
Před měřením tvrdosti bylo potřeba vzorky vyleštit. Z důvodu upnutí do brousícího a leštícího zařízení byly vzorky zataveny do polystyrenu. Takto upravené vzorky byly broušeny a leštěny na přístroji Struers TegraPol-25 se semiautomatickou hlavou. Zrnitost finálního kotouče byla 1 μm. Vyleštěné vzorky byly následně z polystyrenu vyjmuty za teploty 215 °C. Z důvodu odstranění zbytkového polystyrenu byly vzorky očištěny pomocí organického rozpouštědla (Xylen). Měření tvrdosti probíhalo podle Vickerse na digitálním tvrdoměru THV-(1-50)MD. Metoda měření tvrdosti dle Vickerse spočívá v zatlačování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu o vrcholovém úhlu 136 ° do vyleštěného materiálu a následné měření střední délky úhlopříček vtisknutého jehlanu. Zkušební síla byla 10 N a doba zatížení 10 s. Na každém vzorku byly provedeny tři vpichy a výsledné tvrdosti zprůměrovány. Pro měření tvrdosti byla vybrána série vzorků a průměru formy 24 mm.

5 Výsledky a diskuze

5.1 Vylisované vzorky

Během experimentu nastávalo několik komplikací, většinou rozpad vzorku po vyjmutí z lisovací formy. Rozpad byl mnohdy zapříčiněn nedostatečně opatrnou manipulací, ale i velkým zbytkovým napětím ve vzorku. Zbytkové napětí mohlo být zapříčiněno například elastickým odpružením částic. Vzorky o průměru 50 mm byly vylisovány jen do tlaku 50 MPa. V případě vyšších tlaků se vzorky nevykazovali minimální potřebnou soudržnost nutnou pro manipulaci, pravděpodobně vlivem velkých rozdílů ve vnitřním napětíovém poli, a tak byly z experimentu vyloučeny. Rozpadnutí vzorku právě z důvodu vysokého vnitřního pnutí lze pozorovat na obr. 25b).

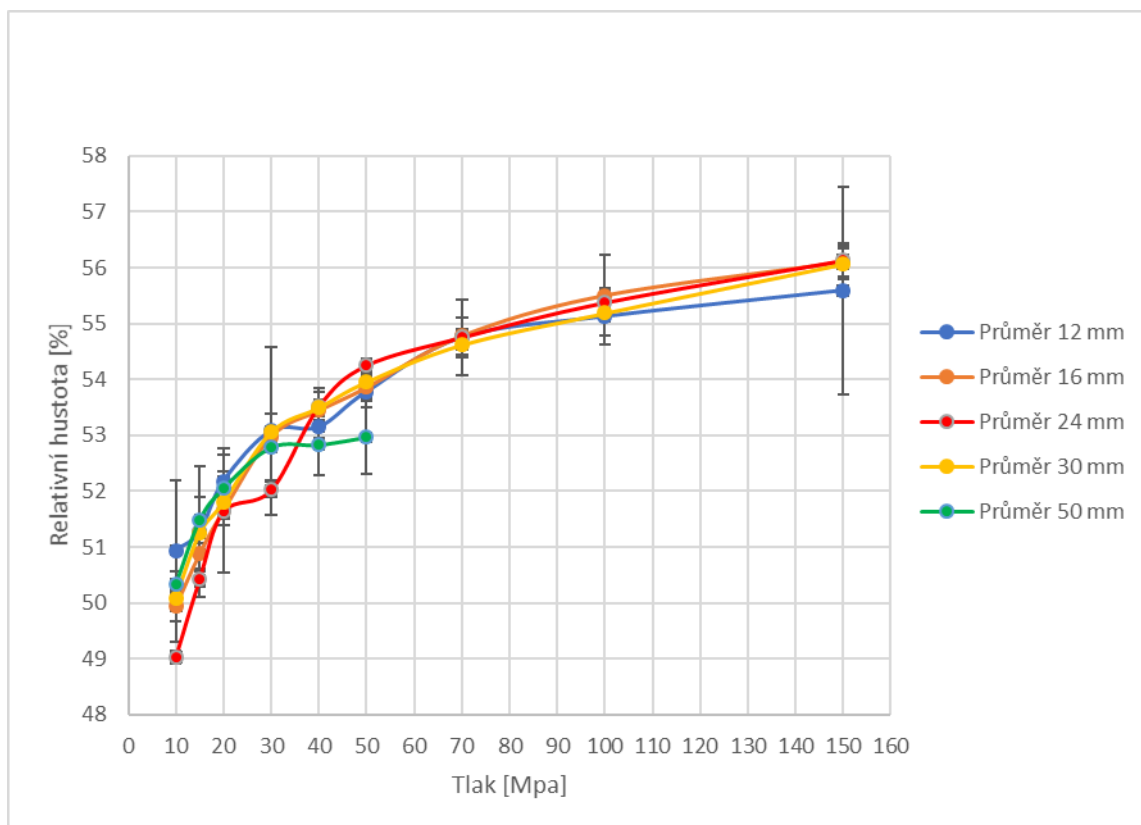
Na obr. 25a) je možné pozorovat ulomenou hranu vylisovaného green body. Tento vzorek má průměr 16 mm a byl lisován při tlaku 15 MPa. Ulomená hrana vznikla v důsledku neopatrné manipulace s green body. Na obr. 25b) se nachází již slinovaný vzorek o průměru 50 mm, lisovaný tlakem 40 MPa. Tento vzorek se však rozpadl ještě ve stavu green body. Při velmi opatrné manipulaci zůstala vrchní část green body v ruce manipulanta a spodní část se ulomila. Toto ulomení je způsobeno velkým gradientem vnitřního pnutí v materiálu například vlivem zaseknutí jednoho z pístů.



Obr. 25: Chybné vzorky a) odlomená hrana vzorku o průměru 16 mm b) rozpadlý vzorek vlivem vnitřního napětí (průměr 50 mm)

Ze získaných výsledků měření vlivu ekvivalentu rychlosti nebyla pozorována žádná závislost, a proto zde nejsou výsledky uvedeny.

Závislost relativní hustoty polotovaru – green body je zobrazena na obr. 26. V grafu lze pozorovat, že relativní hustota roste s rostoucím působícím tlakem. Křivky znázorňující různý průměr formy se téměř překrývají. Vliv průměru formy na relativní hustotu je u menších tlaků větší, protože zde má i větší vliv způsob plnění a lubrikace formy, zatímco u větších tlaků je tento vliv minoritní. Překrývající se křivky tak mohou působit, že vliv velikosti formy je minimální, ale musíme brát v potaz právě tyto faktory ovlivňující relativní hustotu polotovaru.

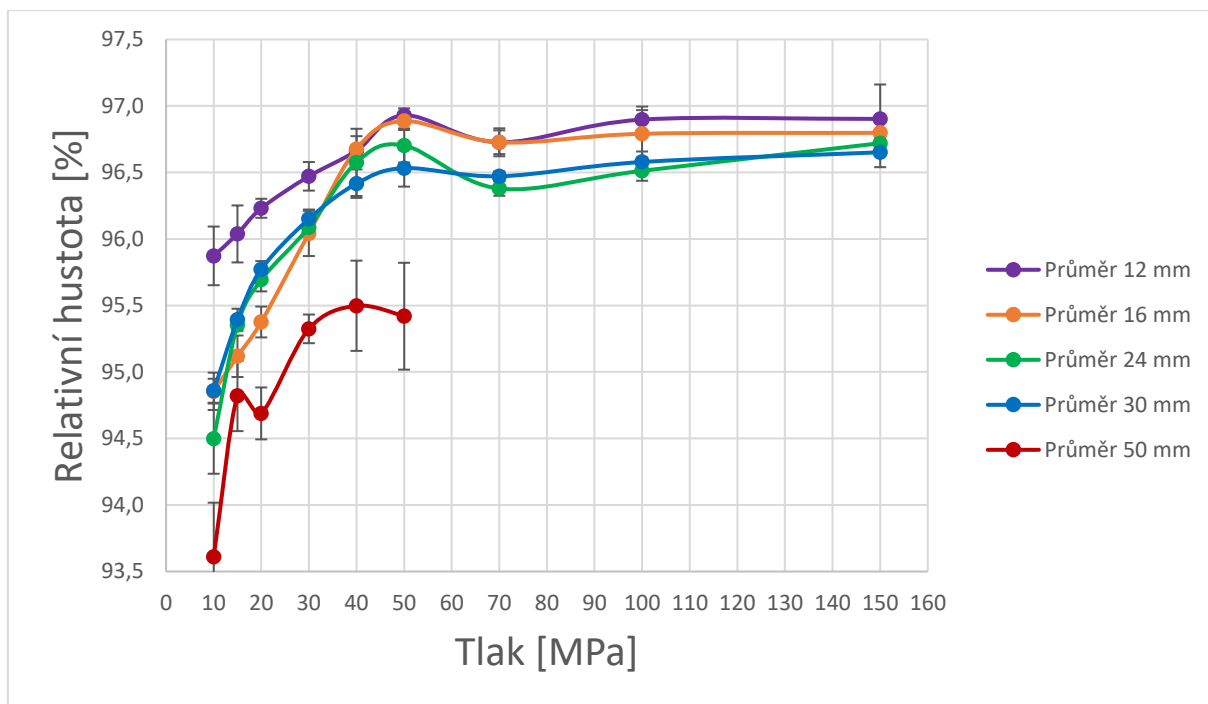


Obr. 26: Graf závislosti relativní hustoty keramických polotovarů (green bodies) na lisovacím tlaku pro různé průměry lisovacích forem

5.2 Slinuté vzorky

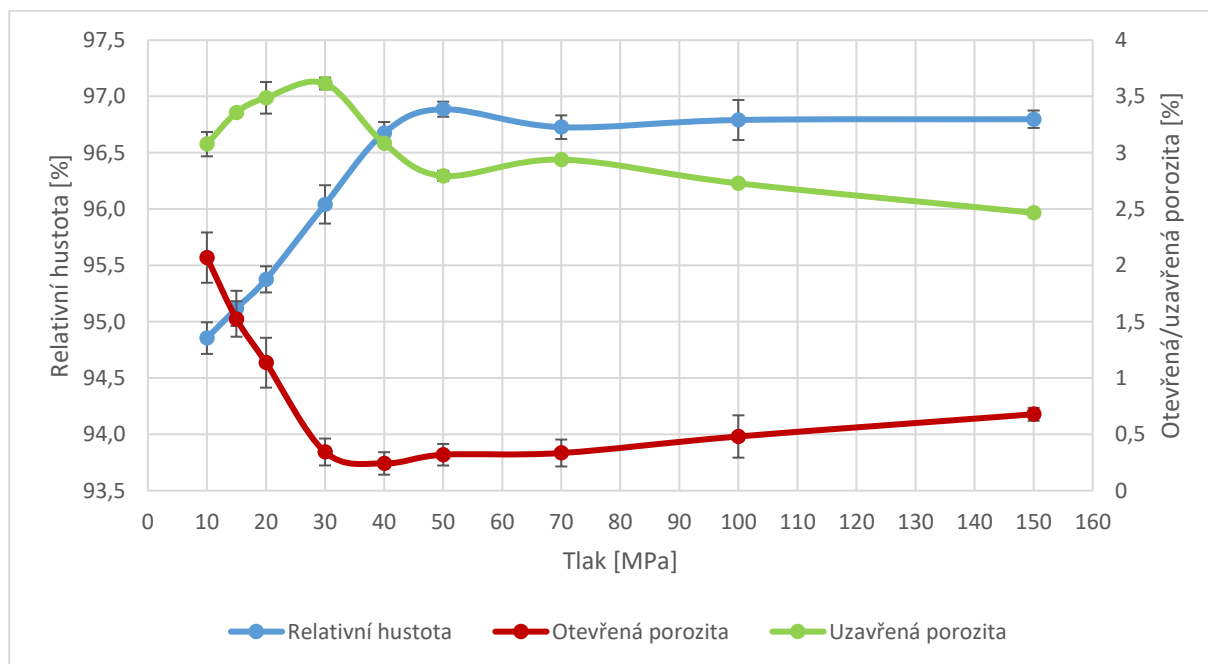
5.2.1 Vliv lisovacího tlaku

Jak je patrné z obr. 27 se zvyšujícím se tlakem se zvyšuje i relativní hustota slinutého vzorku. U všech forem je jasně viditelný mírný lokální pokles relativní hustoty, a to pravděpodobně z důvodu rozpadu aglomerátů (viz. kapitola o uniaxiálním lisování). Pokles relativní hustoty (již u 20 MPa) u formy průměru 50 mm je pravděpodobně dán její značně odlišnou velikostí a také konstrukcí. Forma je novější a jsou u ní menší vůle mezi písty a samotným tělem formy, což má za následek větší vliv tření na relativní hustotu. Nižší relativní hustota může být také způsobena nepřesností z důvodu vylisování nízkého počtu vzorků. Dále lze pozorovat výrazný vliv velikosti formy. Nejvyšší relativní hustoty bylo dosaženo při tlaku 50 MPa u průměru formy 12 mm. Hodnota relativní hustoty při těchto podmínkách činila 96,93 %. Naopak nejnižší hodnoty relativní hustoty byly naměřeny u formy o průměru 50 mm. Nejvyšší hodnoty se u této formy dosáhlo při tlaku 40 MPa a to sice 95,49 %. Jak je patrné se snižujícím se průměrem formy roste relativní hustota vzorku. Relativní hustota u průměru formy 50 mm by se mohla jevit podstatně nižší. Je potřeba si uvědomit, že průměr formy je také skokově vyšší. I právě tento pokles může být způsoben jinou konstrukcí formy a jiným třením, jak již bylo zmíněno výše. Dosažené hodnoty relativní hustoty jsou srovnatelné s prací [10], kde byl použit podobný práškový materiál a proces výroby výlisku.



Obr. 27: Závislost relativní hustoty na tlaku při různém průměru formy

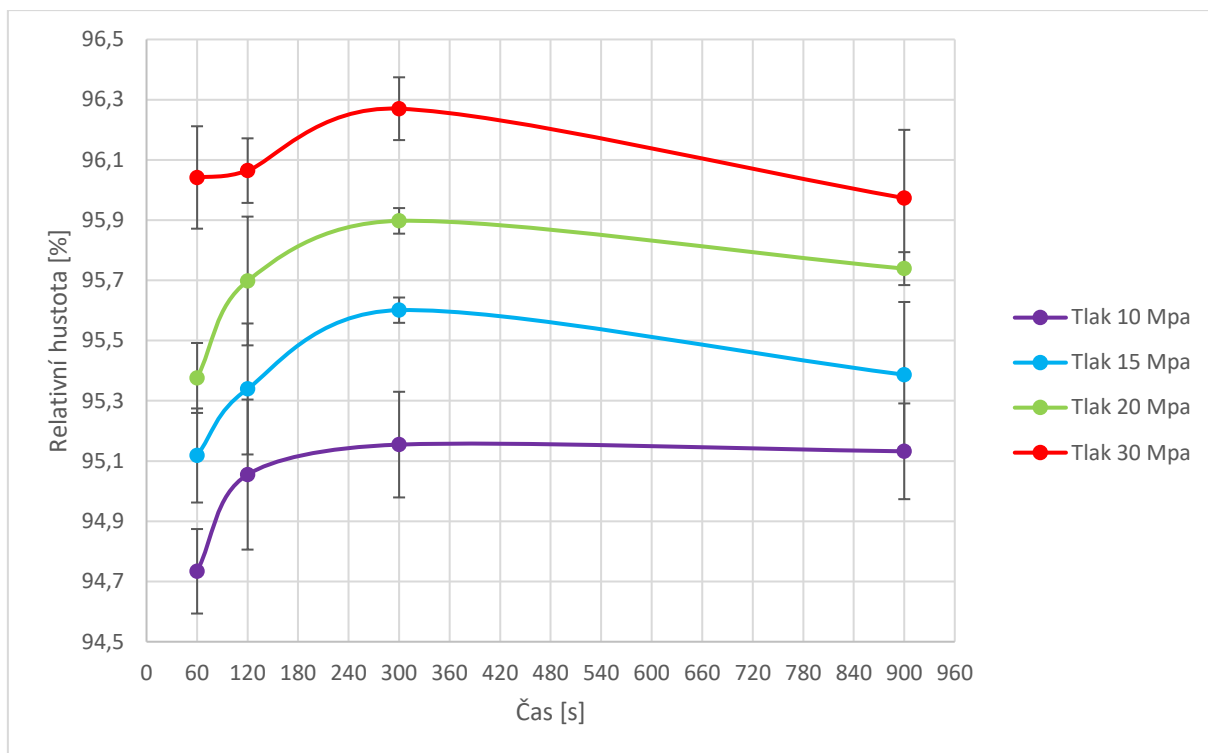
Na obr. 28 lze vidět závislost relativní hustoty, relativní otevřené a uzavřené porozity na tlaku u průměru formy 16 mm. Křivky u zbylých průměrů formy mají velmi podobný tvar, a proto tu nejsou uvedeny. Na všech křivkách uzavřené pórovitosti lze nalézt tlak, kde dochází k relativně významnému poklesu pórovitosti. V tomto místě se pak naopak uzavřená porozita prudce zvyšuje. Nárůst uzavřené porozity za současného poklesu porozity otevřené je dán slinovacím modelem. Kdy v určitém místě dochází k uzavírání otevřených pórů. Otevřená porozita tak klesá a blíží se téměř nule, zatímco uzavřená porozita se pohybuje okolo 2,5 - 3 %. Tento děj probíhá při hustotě vzorku okolo 90-96 %. Z výsledků můžeme vyvodit, že se zvyšujícím se tlakem klesá podíl otevřené porozity (až do tlaku přibližně 40 MPa). Při vyšších tlacích je otevřená porozita velmi nízká, ale lze pozorovat její mírný nárůst. To můžeme přičíst potenciálním trhlinám a prasklinám, které se objevili již po vylisování anebo při slinování vzorků s velkými rozdíly vnitřního napětového pole (rozdíly ve vnitřní a vnější relativní hustotě).



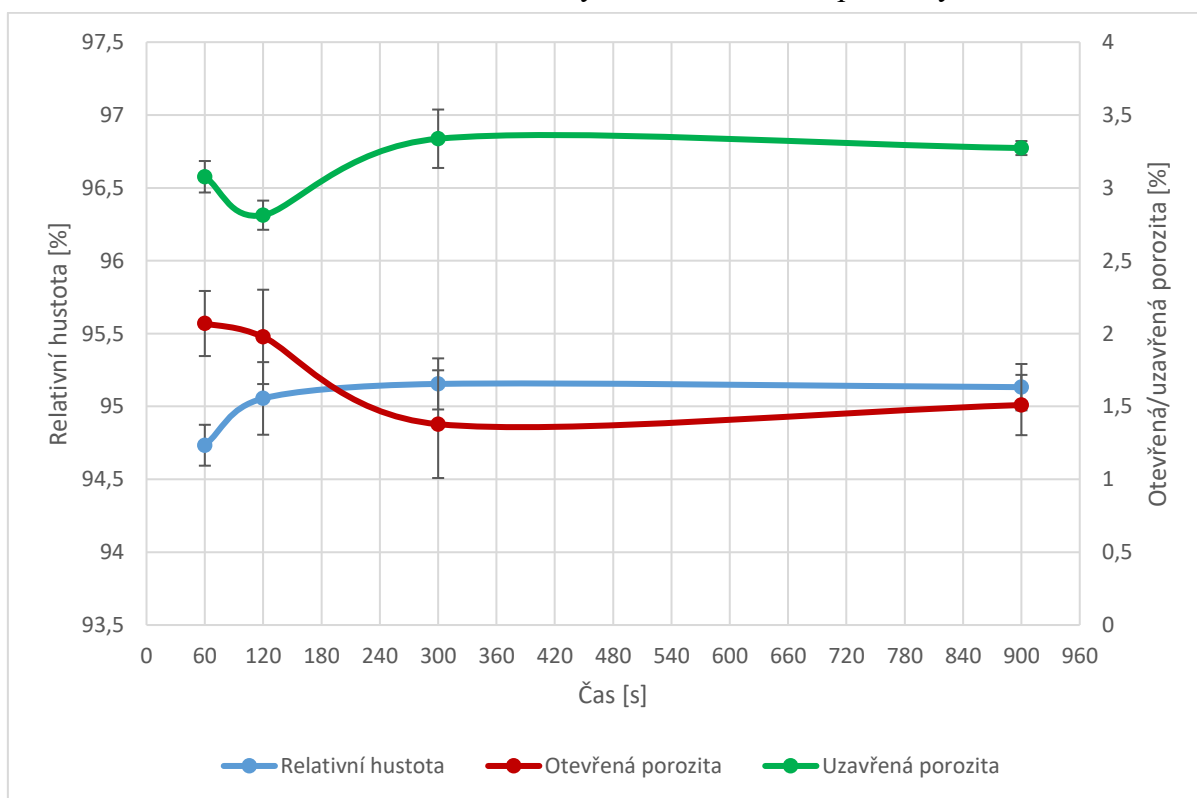
Obr. 28: Závislost relativní hustoty, otevřené a uzavřené porozity na tlaku při průměru formy 16 mm

5.2.2 Vliv výdrže na lisovacím tlaku

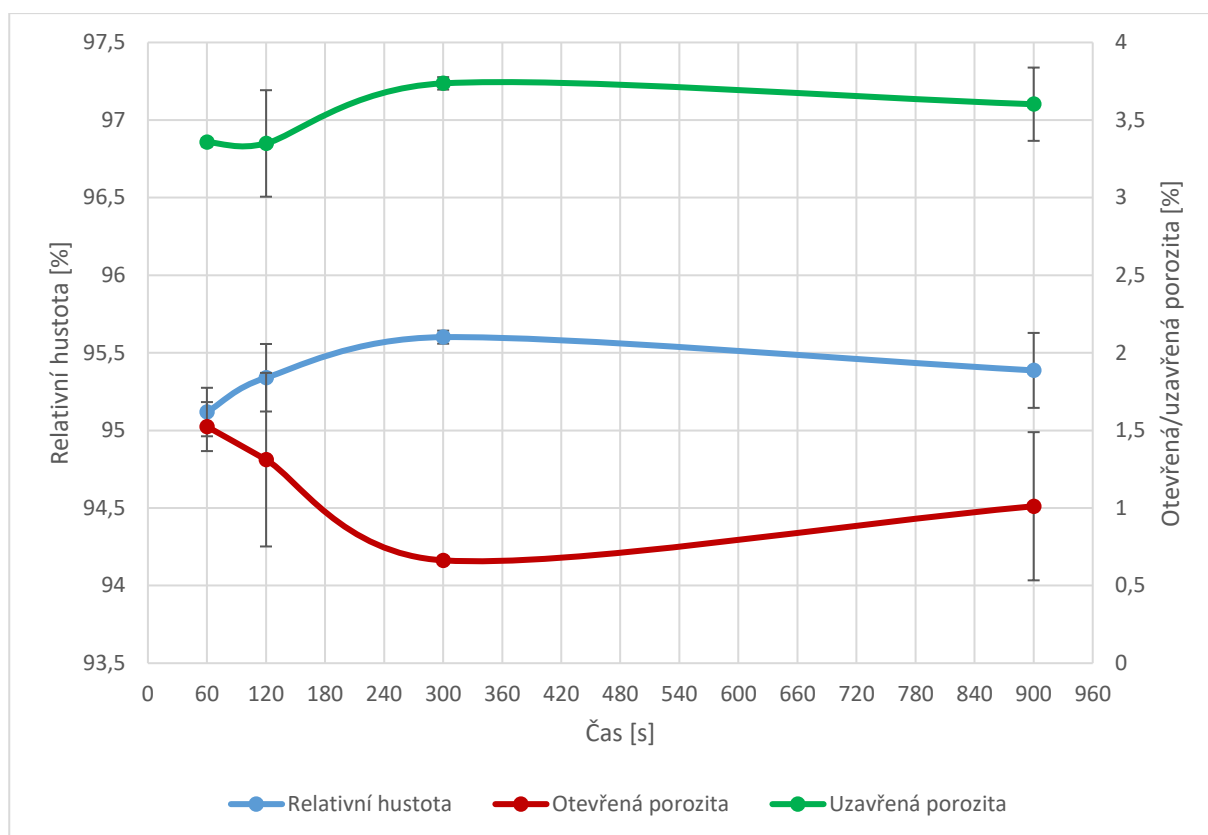
Jak lze vidět na obr. 29, nejvyšší relativní hustoty bylo dosaženo při lisovacím čase 300 s a to u všech použitých tlaků. Při delším lisovacím čase (900 s) se relativní hustota snižuje. To může být způsobeno například zmíněným rozpadem aglomerátů v prášku nebo vznikem trhlin a prasklin. Na obrázcích níže (obr. 30-33) lze vidět závislost relativní hustoty, relativní otevřené a uzavřené porozity na čase při tlacích 10, 15, 20 a 30 MPa. U všech případů lze pozorovat, že křivky otevřené a uzavřené porozity se chovají opačně. Pokud otevřená porozita klesá, uzavřená porozita naopak stoupá. Dále je možné pozorovat, že se zvyšujícím se tlakem stoupá podíl uzavřené porozity a klesá podíl porozity otevřené. Na zmíněných obrázcích můžeme jednoznačně pozorovat uzavírání pórů, kdy otevřená porozita klesá téměř k nule. To se děje mezi druhou a pátou minutou výdrže na lisovacím tlaku. Při tlaku 30 MPa je porozita již uzavřená a pohybuje se nad 3,5 %. Závislost porozity na čase je zjevná. V čase mezi 60 a 300 s otevřená porozita klesá (uzavřená roste) a dále mírně stoupá (uzavřená porozita mírně klesá).



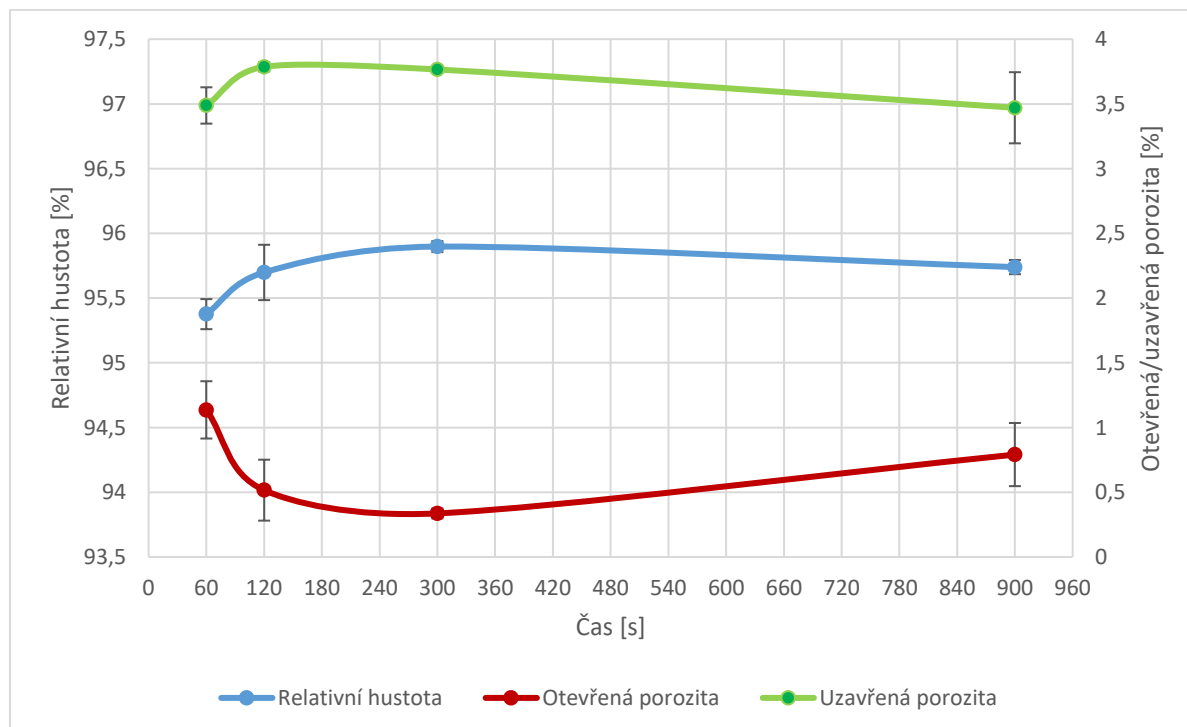
Obr. 29: Závislost relativní hustoty na lisovacím čase při různých tlacích



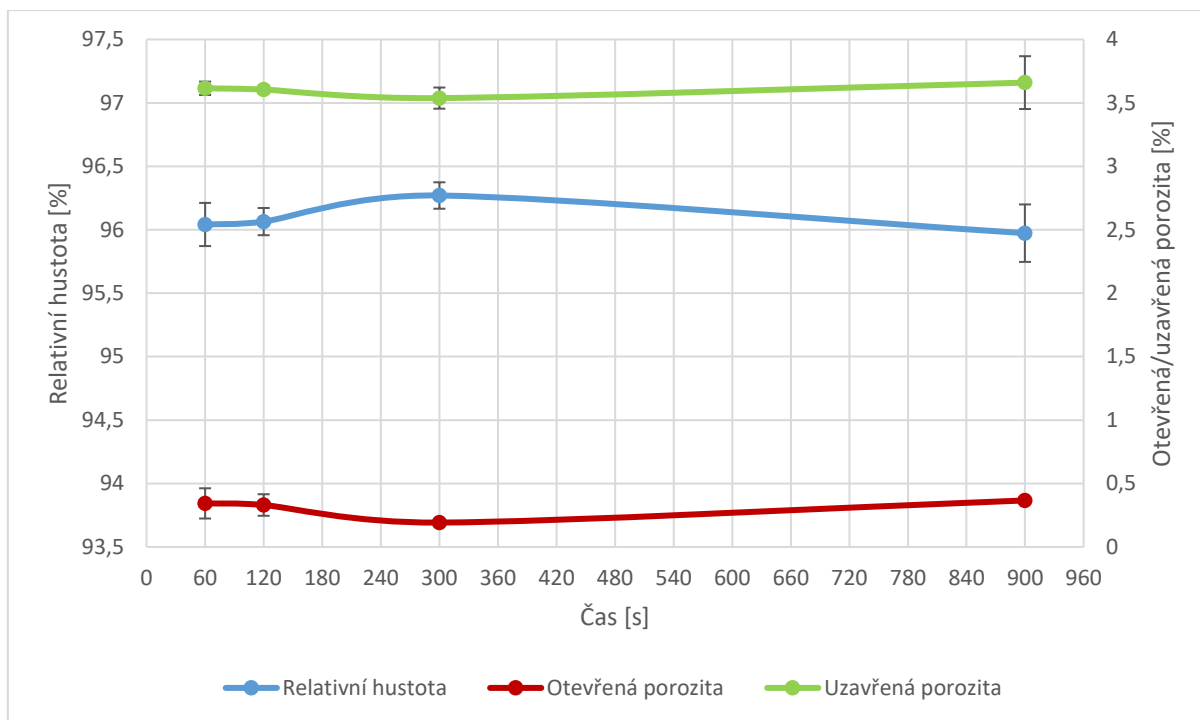
Obr. 30: Závislost relativní hustoty, otevřené a uzavřené porozity na čase při tlaku 10 MPa



Obr. 31: Závislost relativní hustoty, otevřené a uzavřené porozity na čase při tlaku 15 MPa



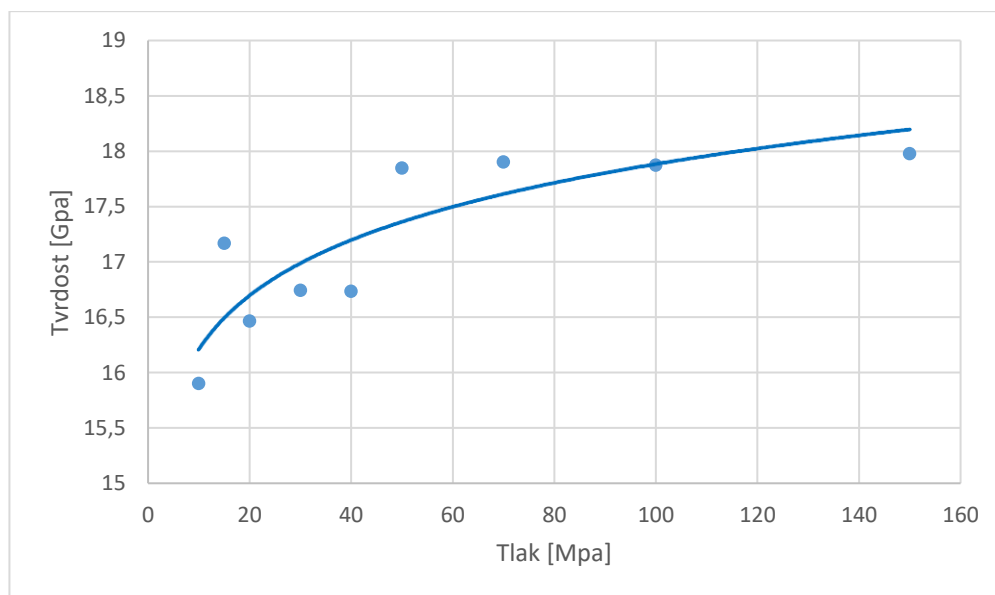
Obr. 32: Závislost relativní hustoty, otevřené a uzavřené porozity na čase při tlaku 20 MPa



Obr. 33: Závislost relativní hustoty, otevřené a uzavřené porozity na čase při tlaku 30 MPa

5.2.3 Vliv lisovacího tlaku na tvrdost vzorku

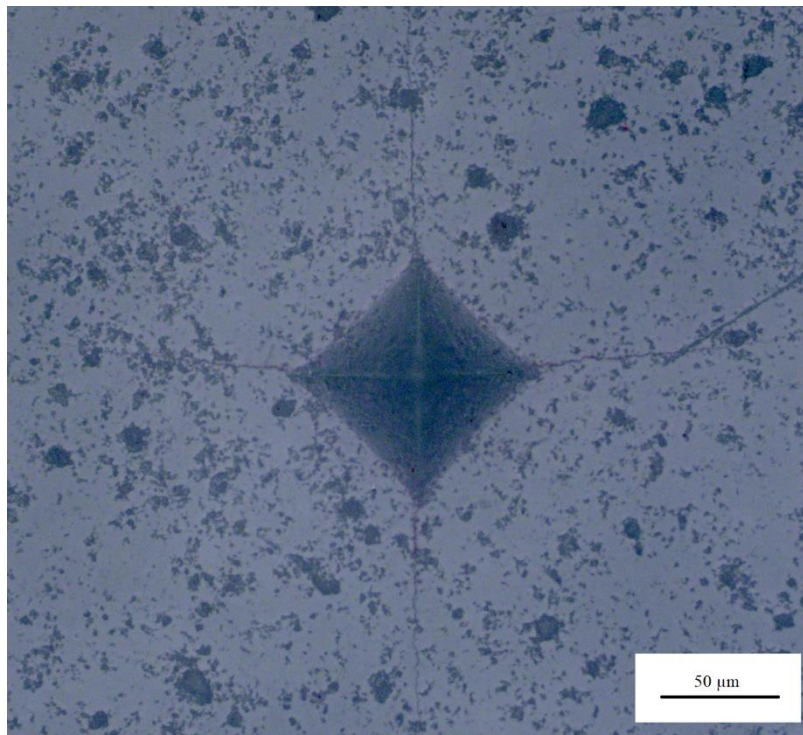
Z grafu níže (obr. 34) je patrné, že se zvyšujícím se tlakem roste i tvrdost. Pokles tlaku mezi 20 a 40 MPa může být způsoben nepřesností měření, protože i odchylka je poměrně vysoká a měření bylo provedeno jen málo (3 měření na jeden vzorek). Nejvyšší hodnota tvrdosti byla naměřena při 150 MPa a to sice 17,97 GPa. Hodnoty tvrdosti mezi 50 a 150 MPa se liší řádově v desetinách GPa.



Obr. 34: Vliv lisovacího tlaku na tvrdost vzorku

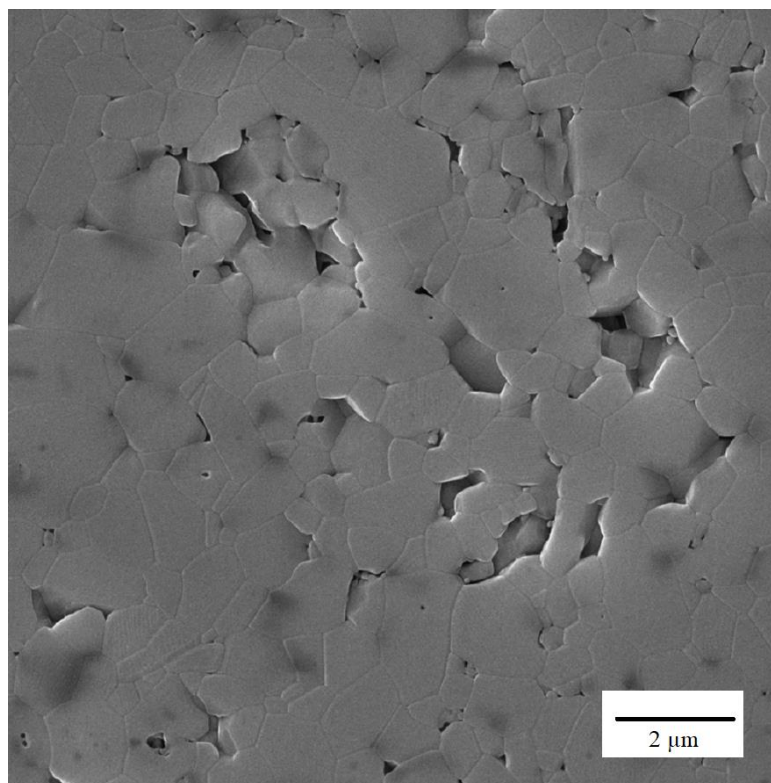
Na obr. 35 lze vidět snímek z mikroskopu vzorku lisovaného tlakem 50 MPa u průměru formy 24 mm. Na snímku lze pozorovat mikrostrukturu vzorku a vpich od jehlanu. Velikost vpichu je dána tvrdostí vzorku. Černé skvrny na snímcích znázorňují vytrhaná zrna z procesu

broušení a porozitu. Vytrhání zrn může být způsobenou vysokou porozitou při nižších tlacích, vysokým napětím na povrchu, prasklinami při tlacích vysokých nebo špatným broušením.



Obr. 35: Snímek z mikroskopu vzorku o lisovacím tlaku 50 MPa

Na obr. 36 lze pozorovat mikrostrukturu vyleptaného vzorku lisovaného tlakem 50 MPa. Na snímku lze vidět hranice jednotlivých zrn i chybějící (vytrhaná) zrna.



Obr. 36: Snímek SEM vyleptaného vzorku

6 Závěr

V první části práce byla nejprve sepsána literární rešerše popisující postup výroby pokročilých keramických materiálů. Hlavní důraz byl kladen na tvarování keramických polotovarů, především pak na uniaxiálním lisování. Druhá část rešeršní práce byla věnována osobní balistické ochraně. V této části byl udělán přehled rozdělení personální balistické ochrany do TBO a popsán historický vývoj personální balistické ochrany. Pozornost byla věnována principu fungování balistických vložek v závislosti na druhu materiálu. Na závěr bylo zmíněno několik současných materiálů využívaných pro výrobu balistické ochrany a materiály, které by v budoucnu mohly sloužit k tomuto účelu.

Experimentální část byla zaměřena na zjištění optimálních parametrů pro uniaxiálním lisování komerčně dostupného Al_2O_3 práškového materiálu. Celkem bylo vylisováno přibližně 200 vzorků za účelem zjištění relativní hustoty a u vybrané série vzorků i tvrdosti dle Vickerse. Tvrdost je jedna z primárních vlastností u balisticky odolných materiálů používaných k ochraně proti AP munici. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že se zvyšujícím se lisovacím tlakem roste i hodnota relativní hustoty. U každého průměru formy byla během zvyšování lisovacího tlaku pozorována deaglomerace – rozpad shluknutých částic prášku, s čímž souvisí lokální pokles relativní hustoty. Nejvyšší relativní hustoty se dosáhlo při tlaku 50 MPa, době lisování 60 s a průměru formy 12 mm. Hodnota činila 96,93 %. U této hodnoty byla naměřena tvrdost vzorku cca 18 GPa. U experimentů věnujícím se vlivu výdrže na lisovacím tlaku, byla nejvyšší relativní hustota dosažena v čase 300 s. Delší časová prodleva způsobila již spíše její pokles. Optimalizovaný proces uniaxiálního lisování bude aplikován pro přípravu pokročilé Al_2O_3 keramiky určené pro balistickou ochranu.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CARTER, C. a M. NORTON. *Ceramic materials: science and engineering*. New York: Springer, 2007. ISBN 978-0-387-46271-4.
- [2] OVČÁČÍKOVÁ, Hana a Jozef VLČEK. *Speciální keramické materiály*. První. Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3365-1.
- [3] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. Brno: CERM, 2002. ISBN 80 720-4248-3.
- [4] BALSHIN, M.Y. The Theory of the Process of Pressing. *Vestnik Metalloprom*. 1938, **18**(2).
- [5] NIESZ, D.E. A Review of Ceramic Powder Compaction. *KONA*. 1996, (14), 44-51.
- [6] THOMPSON, R.A. Mechanics of Powder Pressing: II, Finite-Element Analysis of End-Capping in Pressed Green Powders. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 1981, **60**(2), 244-247.
- [7] ABDULLAH, Omed Gh., Fadhil Abd. RASIN a Tariqq A. AL-DHAHIR. Finite Element Simulation of Alumina Ceramic Powder Compaction. *International Journal of Pure and Applied Physics*. 2009, **5**(1), 15-31. ISSN 0973-1776.
- [8] BRISCOE, B.J. a S.L. ROUGH. The effects of wall friction in powder compaction. *Colloids and Surfaces A*. 1998, (137), 103-116.
- [9] MELO, C.C., A.L.I. MORAES, F.O. ROCCO, F.S. MONTILHA a R.B. CANTO. A validation procedure for numerical models of ceramic powder pressing. *Journal of the European Ceramic Society*. 2018, (38), 2928-2936.
- [10] SUVACL, Ender a Gary L. MESSING. Textured Alumina Ceramics by Uniaxial Pressing. *Key Engineering Materials*. 2001, **206-213**, 405-408. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.206-213.405. ISSN 1662-9795. Dostupné také z: <https://www.scientific.net/KEM.206-213.405>
- [11] KATSNEL'SON, L.M. a B.M. KERBER. Determination of the Optimal Uniaxial Pressing Pressure for Ceramic Powders. *GLASS AND CERAMICS*, 2014. Vol. 70, issue 9-10. b.r., p. 319-323.
- [12] RAHAMAN, M. *Ceramic processing and sintering*. 2nd ed. New York: M. Dekker, 2003. ISBN 08-247-0988-8.
- [13] OMATETE, O., Mark JANNEY a Stephen NUNNN. Gelcasting: From laboratory development toward industrial production. *Journal of the European Ceramic Society*. 1997, **17**(2), 407-413.
- [14] MALÍK, P. *Transparentní polykrystalické keramiky pro balistické a vysokoteplotní aplikace*. Brno, 2015. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Prof. Ing. Martin Trunec, Dr.

- [15] KANG, S.L. *Sintering: densification, grain growth and microstructure*. 1st ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 07-506-6385-5.
- [16] RAHAMAN, Mohamed. *Sintering of Ceramics*. Broken Sound Parkway NW: CRC Press Taylor and Francis Group, 2007. ISBN 978-1-4200-0705-3.
- [17] SHEN, J.Z. a T. KOSMAČ. *Advanced ceramics for dentistry*. 2014.
- [18] ATKINSON, H. a S. DAVIES. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000, **31**(12), 2981-3000. DOI: 10.1007/s11661-000-0078-2. ISSN 1073-5623. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s11661-000-0078-2>
- [19] DOBRZAŃSKI, Leszek, Anna DOBRZAŃSKA-DANIKIEWICZ, Anna ACHELNIK-FRANCZAK, Lech DOBRZAŃSKI, Eugeniusz HAJDUCZEK a Grzegorz MATULA. Fabrication Technologies of the Sintered Materials Including Materials for Medical and Dental Application. DOBRZAŃSKI, Prof. *Powder Metallurgy - Fundamentals and Case Studies*. 2017. DOI: 10.5772/65376. Dostupné také z: <https://www.intechopen.com/books/powder-metallurgy-fundamentals-and-case-studies/fabrication-technologies-of-the-sintered-materials-including-materials-for-medical-and-dental-applic>
- [20] KRUPICA, Dalibor. *Studie odolnosti prostředků osobní balistické ochrany pracovníka SBS*. Zlín, 2012. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Ing. Ján Ivanka.
- [21] TARASOV, Petr. *Prostředky individuální ochrany člověka proti působení kineticko-energetických střel a střepin zavedené ve výzbroji ozbrojených bezpečnostních sborů*. Praha, 2017. Bakalářská práce. Vysoká škola regionálního rozvoje. Vedoucí práce Mgr. Milan Prchal.
- [22] ČSN 39 5360 (395360). *Zkoušky odolnosti ochranných prostředků. Zkoušky odolnosti proti střelám, střepinám a bodným zbraním. Technické požadavky a zkoušky*. Praha: Český normalizační institut, 1996. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [23] UHER, Michal. *Balistická ochrana trupu pro vojenské účely* [online]. 2015 [cit. 2018-04-18]. Dostupné z: <http://www.armadinoviny.cz/balisticka-ochrana-trupu-pro-vojenske-ucely.html>
- [24] KRUPICA, Dalibor. *Studie využití prostředků balistické ochrany v SBS*. Zlín, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Ján Ivanka.
- [25] *Ballistic Resistance of Body Armor NIJ Standard-0101.06*. Washington, DC: National Institute of Justice Office of Science and Technology, 2008.
- [26] *Střelecké revue*. 2016, **48**(11). ISSN 0322-7650.
- [27] ONDRÁČEK, Jan, Petr GIGERICH, Barbora ŠIMONOVÁ, David RŮŽIČKA, Petr FRINTA, Martin DRKAL a David HŮRKA. *Střelecká příprava. Fakulta sportovních studií Masarykova univerzita* [online]. 2013 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.fsps.muni.cz/inovace-SEBS-ASEBS/elearning/strelba/informace>

- [28] MAY, Timothy Michael. *The Mongol empire: a historical encyclopedia*. Santa Barbara, California: ABC-CLIO, an imprint of ABC-CLIO, LLC, 2017. ISBN 978-1-61069-339-4.
- [29] MANSOOR, Peter. Armour. *Encyclopædia Britannica* [online]. Encyclopædia Britannica, inc., b.r. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/topic/armour-protective-clothing>
- [30] CIESIELSKA-WROBEL, Izabela. *Contemporary Personal Ballistic Protection (PBP)*. Rijeka: InTech, 2017, Ch. 8. DOI: 10.5772/intechopen.69085. ISBN 978-953-51-3501-2. Dostupné také z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.69085>
- [31] GRAFTON, Carol Belanger. *Arms and armor: a pictorial archive from nineteenth-century sources*. New York: Dover Publications, 1995. ISBN 04-862-8561-8.
- [32] Giuseppe Piva. *Samurai Armor Collection from Giuseppe Piva Japanese Art* [online]. Milano, Italy, b.r. [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.giuseppepiva.com/en/services>
- [33] *Weapon.tistory.com* [online]. 2007 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: http://cfs4.tistory.com/upload_control/download.blog?fhandle=YmxvZzEyNTg0M0BmczQudGlzdG9yeS5jb206L2F0dGFjaC8wLzAzMDAwMDAwMDAwOS5qcGc%3D. Text v korejštině.
- [34] M-1951 USMC Armored Vest. In: *OLIVE-DRAB* [online]. 2011 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://olive-drab.com/od_soldiers_gear_body_armor_korea.php
- [35] Why are you calling Chicken?. In: *VietnamGear.com* [online]. b.r. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.vietnamgear.com/Article.aspx?Art=91>
- [36] Český nosič panelů RAPTOR 2.0. In: *ARMÁDNÍ NOVINY* [online]. 2017 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: <http://www.armadninoviny.cz/cesky-nosic-panelu-raptor-2-0-evoluce-v-praxi.html>
- [37] MAYORGA, M., I. ANDERSON, J. VAN BREE, P. GOTTS, J. SARRON a P. KNUDSEN. *Thoracic response to undefeated body armour (HFM-024)*. NATO Research and Technology Organisation, 2010.
- [38] PRAT, N., F. RONGIERAS, J.-C. SARRON, A. MIRAS a E. VOIGLIO. Contemporary body armor: technical data, injuries, and limits. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*. 2012, **38**(2), 95-105. DOI: 10.1007/s00068-012-0175-0. ISSN 1863-9933. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00068-012-0175-0>
- [39] CHINEVRE, TD, BS CADARETTE, DA GOODMAN, BR ELY, SN CHEUVRONT a MN SAWKA. *Efficiency of body ventilation system for reducing strain in warm and hot climates*. Eur J Appl Physiol, 2008.
- [40] LEHMACHER, EJ, P. JANSING a T. KÜPPER. *Thermophysiological responses caused by ballistic bullet-proof vests*. Ann Occup Hyg, 2007.

- [41] ASENOV, St., L. LAKOV a Kr. TONCHEVA. Promising ceramic materials for ballistic protection. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2013, **48**(2), 190-195.
- [42] LINHART, Josef. *Materiály použitelné pro výrobu balistických vest*. Zlín, 2016. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Michal Gracla.
- [43] LUKÁŠ, Luděk. *Bezpečnostní technologie, systémy a management I*. 1. vydání. Zlín: Radim Bačuvčík - VeRBuM, 2011-2015. ISBN 978-80-87500-05-7.
- [44] LUKÁŠ, Luděk. *Bezpečnostní technologie, systémy a management II*. 1. vydání. Zlín: Radim Bačuvčík - VeRBuM, 2012. ISBN 978-80-87500-19-4.
- [45] *Ballistic Impact Mechanisms of Materials* [online]. 2014 [cit. 2018-03-31]. Dostupné z: <http://www.virginia.edu/ms/research/wadley/ballistic-impact.html>
- [46] MATERNA, Aleš. Pevné, pevnější, nejpevnější. In: *Katedra materiálů Fakulty jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v Praze* [online]. b.r. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: http://fyzu3v.fjfi.cvut.cz/current/web/prednasky/Materna_u3v2012.pdf
- [47] LIŠKA, Přemysl. Balistická ochrana jednotlivce: setrvalý stav, anebo dynamický vývoj?. *Střelecké revue*. 2016, **48**(11), 83-96. ISSN 0322-7650.
- [48] SCHULDIES, J.J. a R. NAGESWARAN. Ceramic matrix composites for ballistic protection of vehicles and personnel. *Blast protection of civil infrastructures and vehicles using composites*. Cambridge: Woodhead Pub, 2010, s. 235-243. ISBN 9781845698034.
- [49] Dragon skin. In: *Professionalsoldiers* [online]. 2006 [cit. 2018-04-23]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/17/PEO_soldier_Dragonskin.jpg
- [50] ODANOVIĆ, Zoran a Biljana BOBIĆ. Ballistic protection efficiency of composite ceramics/metal armours. *Scientific-Technical Review*. 2003, , 30-37.
- [51] Nepřízpusobivý pavouci a jejich nepřekonatelné pavučiny. *Materialtimes.com* [online]. b.r. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.materialtimes.com/vsimame-si/neprizpusobivi-pavouci-a-jejich-neprekonatelne-pavuciny.html>
- [52] Pevný jako pavučina. *Ideje.cz* [online]. b.r. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://ideje.cz/cz/clanky/pevny-jako-pavucina>
- [53] GROHMANN, Jan. Unikátní pancíř pro neprůstřelné vesty. *Armadninoviny* [online]. b.r. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://www.armadninoviny.cz/unikatni-tekuty-pancir-pro-neprustrelne-vesty.html>
- [54] Tekutý pancíř pro vojáky budoucnosti. *Armyweb.cz* [online]. 2013 [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <https://www.armyweb.cz/clanek/tekuty-pancir-pro-vojaky-budoucnosti>
- [55] PŘEMYSL, Liška. Balistická ochrana jednotlivce: setrvalý stav, anebo dynamický vývoj?. In: *Střelecké revue I. 11. roč. 48, č. 11*. 2016, s 83-96. ISSN 0322-7650.
- [56] SHIN, Jung-Hoo, Jonghyun CHOI, Miyoung KIM a Seong-Hyeon HONG. Comparative study on carbon nanotube and reduced graphene oxide-reinforced alumina ceramic composites. *Ceramics International*. 2018, **44**(7), 8350-8357. DOI:

10.1016/j.ceramint.2018.02.024. ISSN 02728842. Dostupné také z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884218303201>

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	Název
CIP	cold isostatic pressing
HIP	hot isostatic pressing
PVA	polyvinyl alkohol
SEM	Scanning electron microscope
SLA	selektivní laserové slinování
T _m	teplota tavení

Symbol	Jednotka	Název
ρ_{rel}	[%]	Relativní hustota
ρ_{teor}	[g/cm ³]	Teoretická hustota
ρ_w	[g/cm ³]	Hustota vody
d	[m]	Průměr
F	[N]	Síla
m _{Arch}	[g]	Archimedova hmotnost
m _{nas}	[g]	Nasákavá hmotnost
m _s	[g]	Suchá hmotnost
P	[Pa]	Tlak
S	[m ²]	Plocha
π	[-]	Pí

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1: Příčný průřez mlýna znázorňující pohyb částic materiálu [1]
- Obr. 2: Fáze procesu uniaxiálního lisování
- Obr. 3: Znázornění hustoty v závislosti na vzdálenosti od působící síly po a) jednostranném uniaxiálním lisování a vylisování vzorku b) následném izostatickém přelísování při 25 MPa c) izostatickém přelísování při 200 MPa [9]
- Obr. 4: Závislost lisovacího tlaku na hustotě green body [11]
- Obr. 5: Izostatické lisování [1]
- Obr. 6: Schéma suspenzního lití a) nalití suspenze do formy b) tvrdnutí suspenze c) vylití přebytečné suspenze z formy d) vyjmutí ztvrdlé suspenze z formy [3]
- Obr. 7: Schéma metody tape casting [1]
- Obr. 8: Schéma injekčního vstřikování [1]
- Obr. 9: Schéma metody extruze A) tyč B) trubka [1]
- Obr. 10: Slinování (zhutnění a hrubnutí zrn) [17]
- Obr. 11: Fáze slinování [17]
- Obr. 12: Schéma izostatického lisování [19]
- Obr. 13: Kroužková zbroj
- Obr. 14: Francouzská zbroj pocházející z 13. (a,b) a 14. století (c) [31]
- Obr. 15: Samurajská zbroj z 18. století [32]
- Obr. 16: Korejská bavlněná zbroj [33]
- Obr. 17: Flak jackets [24]
- Obr. 18: Vesta M1951 [34]
- Obr. 19: Nosič panelů RAPTOR 2.0 [36]
- Obr. 20: Průběh zastavení letícího projektilu pomocí vláken [38]
- Obr. 21: Schéma průběhu zastavení letícího projektilu pomocí keramického a podpurného plátu [45]
- Obr. 22: Rentgenový snímek vesty Dragon skin [49]
- Obr. 23: Objemová distribuce rozložení částic získaná z laserové difrakce
- Obr. 24: Snímek zrn použitého prášku
- Obr. 25: Chybné vzorky a) odlomená hrana vzorku o průměru 16 mm b) rozpadlý vzorek vlivem vnitřního napětí (průměr 50 mm)
- Obr. 26: Graf závislosti relativní hustoty keramických polotovarů (green bodies) na lisovacím tlaku pro různé průměry lisovacích forem
- Obr. 27: Závislost relativní hustoty na tlaku při různém průměru formy
- Obr. 28: Závislost relativní hustoty, otevřené a uzavřené porozity na tlaku při průměru formy 16 mm
- Obr. 29: Závislost relativní hustoty na lisovacím čase při různých tlacích
- Obr. 30: Závislost relativní hustoty, otevřené a uzavřené porozity na čase při tlaku 10 MPa
- Obr. 31: Závislost relativní hustoty, otevřené a uzavřené porozity na čase při tlaku 15 MPa
- Obr. 32: Závislost relativní hustoty, otevřené a uzavřené porozity na čase při tlaku 20 MPa
- Obr. 33: Závislost relativní hustoty, otevřené a uzavřené porozity na čase při tlaku 30 MPa
- Obr. 34: Vliv lisovacího tlaku na tvrdost vzorku

Obr. 35: Snímek z mikroskopu vzorku o lisovacím tlaku 50 MPa

Obr. 36: Snímek SEM vyleptaného vzorku