

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní**

Ústav materiálového inženýrství



Diplomová práce

Závislost mechanických vlastností výrobku na
parametrech procesu rotačního spékání

Autor: Antonín Železný
Studijní obor: Výrobní inženýrství
Vedoucí práce: prof. RNDr. Špatenka Petr CSc.
Praha 2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Železný** Jméno: **Antonín** Osobní číslo: **456777**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Závislost mechanických vlastností výrobku na parametrech procesu rotačního spékání

Název diplomové práce anglicky:

The dependence of product mechanical properties on parameters of rotational molding

Pokyny pro vypracování:

- 1) Připravit sadu vzorků v laboratorním zařízení při různých parametrech
- 2) Provést analýzu mechanických vlastností a struktury připravených vzorků
- 3) Na základě provedené analýzy navrhnout metodiku kontroly kvality aplikovatelnou v průmyslovém procesu
- 4) Otestovat navrženou metodiku na výrobě rekreačních lodí

Seznam doporučené literatury:

Jiří Štěpek, Jiří Zelinger, Antonín Kuta: Technologie zpracování a vlastnosti plastů. SNTK 1989
Ogila K., Shao, M., Yang, W., Tan, J.: Rotational molding: A review of the models and materials. Express Polymer Letters 11 (2017) 778
Crawford R.J., Throne J.L.: Rotational molding technology. William Andrew Publishing 2002
časopisecká literatura - její vyhledání je součástí práce.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **04.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis



Poděkování

Děkuji panu prof. RNDr. Petru Špatenkovi CSc. za vedení mé diplomové práce a paní ing. Zdeňce Jeníkové, PhD a ing. Janu Krčilovi za odborné rady a asistenci při práci v laboratoři.

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou zpracování polyethylenu pomocí metody rotačního natavování. Hlavním tématem je závislost mechanických vlastností výrobku na zvolených procesních parametrech. V rámci teoretické části je popsána technologie rotačního natavování, její výhody, nevýhody a používaná zařízení. V praktické části byly testovány mechanické vlastnosti připravených vzorků s rozdílnou maximální dosaženou teplotou vzduchu uvnitř formy. Zkoumaným materiálem byl vysoko hustotní polyethylen SURPASS s označením RMs245-U(UG) od firmy NOVA Chemicals.

Klíčová slova

Rotační natavování, mechanické vlastnosti, vysokohustotní polyethylen, procesní parametry

Annotation

This diploma thesis deals with processing polyethylene using the rotational moulding method. The main focus is on the dependency of mechanical properties of a product on chosen process parameters. The theoretical part of the thesis contains research about rotational moulding, its advantages, disadvantages and manufacturing machines. In the practical part the mechanical properties of prepared samples were tested. Each sample was prepared with a different maximum temperature inside the mould during the manufacturing process. The material used was high-density polyethylene SURPASS RMs245-U(UG) from NOVA Chemicals company.

Keywords

Rotational moulding, mechanical properties, high density polyethylene, process parameters

Seznam zkratek

Al_2O_3	Oxid hlinitý	
HDPE	Vysokohustotní polyethylen	
LDPE	Nízkohustotní polyethylen	
MDPE	Polyethylen se střední hustotou	
MFI	Index toku taveniny – Melt Flow Index	
MFR	hmotnostní index toku taveniny - Melt Flow Rate	
MVR	objemový index toku taveniny - Melt Volume Rate	
PE	Polyethylen	
SD	Směrodatná odchylka	
A	Počáteční průřez zkušebního tělesa	[mm ²]
a_{cN}	Rázová houževnatost	[J/mm ²]
b	Šířka zkušebního tělesa	[mm]
b_N	Šířka zkušebního tělesa pod vrubem	[mm]
E	Modul pružnosti	[kN/mm ²]
E_c	Energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa	[J]
F_{max}	První lokální maximum pozorované v průběhu tahové zkoušky	[N]
F_y	Síla na mezi kluzu	[N]
h	Tloušťka zkušebního tělesa	[mm]
σ_m	Napětí na mezi pevnosti	[Mpa]
σ_y	Napětí na mezi kluzu	[Mpa]

1	Úvod	5
2	Teoretická část	6
2.1	Rotační natavování	6
2.1.1	Princip	6
2.1.2	Průběh	7
2.1.3	Výhody rotačního natavování	7
2.1.4	Nevýhody rotačního natavování	8
2.1.5	Druhy výrobních zařízení	9
2.1.5.1	Stroj typu Rock-and-Roll	10
2.1.5.2	Stroj typu Karusel	12
2.1.5.3	Stroj typu Shuttle	13
2.1.6	Procesní parametry rotačního natavování	13
2.1.7	Požadavky na materiály	16
2.1.8	Polyethylen	16
2.1.9	Kvalita součástí	18
2.1.9.1	Mechanismus vzniku vzduchových bublin	20
2.1.9.2	Mechanismus odstranění vzduchových bublin	20
3	Praktická část.....	22
3.1	Zkušební zařízení	22
3.1.1	Příprava formy	23
3.1.2	Pracovní cyklus.....	23
3.2	Příprava vzorků	24
3.3	Zkouška rázem v ohybu	25
3.4	Zkouška tahem	27
3.5	Pozorování na mikroskopu.....	29
4	Výsledky	30
4.1	Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu.....	30
4.2	Vyhodnocení zkoušky tahem	34
4.3	Vyhodnocení pozorování na mikroskopu	37
5	Závěr	41
6	Zdroje	43
7	Přílohy	46

1 Úvod

Firma Železný s.r.o. vyrábí polyethylenové kánoe a kajaky metodou rotačního natavování. Zejména kajaky jsou při používání vystavovány velkému namáhání. Ze strany zákazníků jsou na ně kladeny protichůdné požadavky. Na jedné straně je co nejnižší váha lodi, díky které je loď obratnější a lépe se přenáší, na straně druhé stojí celková tuhost a rázová houževnatost. Právě tyto dva parametry jsou velmi ovlivněny správným nastavením parametrů výrobního procesu. Při nedostatečném „dopečení“ lodi nestihne materiál dosáhnout dostatečné pevnosti. Naopak při „přepečení“ je loď křehčí a hrozí její prasknutí, což má nejen špatný vliv na jméno firmy, ale zejména pro vrcholové jezdce to může znamenat bezpečnostní riziko. Správné nastavení procesních parametrů je proto nutné pravidelně kontrolovat.

V dnešní době je nastavení procesních parametrů prováděno podle know-how získaného v průběhu let fungování firmy. Výrazné přehřátí materiálu lze snadno poznat i bez předchozích zkušeností podle charakteristického zápachu, zažloutnutí a lesklého povrchu. Indikátorem výrobku, který nebyl dostatečně sintrován jsou zas bublinky uvězněné v materiálu a na povrchu výrobku. Jejich hustota výskytu a velikost naznačují stupeň „nedopečení“ lodi. Tyto zkoušky však poskytují pouze hrubý odhad spodní a horní hranice intervalu teplot, použitelných pro výrobu.

V rámci teoretické části této práce bude popsána technologie rotačního natavování, její výhody, nevýhody a používaná zařízení. Dále bude zkoumáno chování materiálu v průběhu výrobního procesu a zhodnoceny vlivy na výslednou kvalitu výrobku.

Praktická část bude zaměřena na otestování nově zavedeného materiálu do výroby ve firmě Železný s.r.o. Bude připravena sada vzorků s rozdílnými procesními parametry a pro tyto vzorky následně provedena analýza mechanických vlastností a struktury s využitím zkoušky rázem v ohybu, zkoušky tahem a pozorování pomocí digitálního mikroskopu.

Cílem práce je otestovat a zhodnotit závislost materiálových vlastností na způsobu přípravy vzorků a získané poznatky aplikovat na výrobu plastových lodí ve firmě Železný s.r.o.

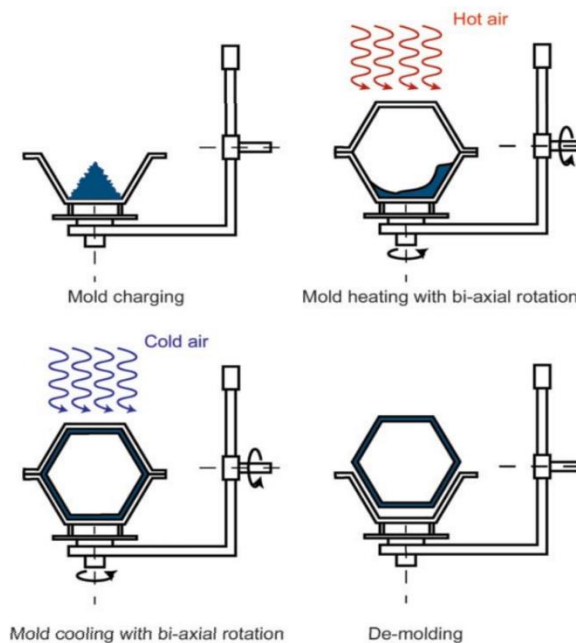
2 Teoretická část

2.1 Rotační natavování

Rotační natavování, anglicky rotational moulding (možno nalézt taktéž pod názvy rotomoulding nebo rotational casting), je metoda výroby dutých plastových výrobků umožňující výrobu bezešvých součástí z různých druhů termoplastů. Oproti vstřikování nebo vyfukování se nejedná o velmi rozšířenou metodu, nabízí však možnosti velmi obtížně dosažitelné jinými způsoby zpracování. Pomocí rotomouldingu je možná vyrábět velkou škálu výrobků rozličných tvarů a velikostí od malých a jednoduchých až po velké a komplexní. [1, 2]

2.1.1 Princip

Základní princip metody rotačního natavování se skládá ze čtyř fází znázorněných na **obrázku 1**. Plnění formy, její umístění do pece a ohřev, chlazení a vyjmutí hotového výrobku.



Obrázek 1: Fáze rotačního natavování, převzato z [4]

2.1.2 Průběh

Materiál, většinou v podobě prášku případně granulátu, je uzavřen do kovové formy a vložen do pece. Forma i s práškem je postupně nahřívána až na teplotu tavení použitého polymeru. Zároveň celá forma rotuje kolem dvou os (v případě podlouhlých výrobků se využívá rotace podle delší osy a kývání podle jedné z kratších os – takzvaná metoda rock and roll). Rychlost rotace bývá pro jednotlivé osy většinou rozdílná (obvykle 4:1, hlavní:vedlejší) a směr rotace je možné v případě potřeby otáčet. Práškový polymer se ve formě přesypá a postupně se natavuje na její vnitřní stěny.

Po natavení celého objemu použitého prášku následuje fáze chlazení. V této fázi forma pokračuje v rotaci, dokud nedojde ke ztuhnutí výrobku v požadovaném tvaru. Pro urychlení chlazení bývá k formě přiváděn studený vzduch. Dále je možné využít chlazení vodou, případně vnitřní chlazení zabudované přímo do těla formy.

V poslední fázi je forma otevřena a výrobek vyjmut ven. Teplota při vyndávání musí být dostatečně nízká, aby již nemohlo dojít k zborcení či zkroucení výrobku vlivem nerovnoměrného chlazení. Následně je možné formu znovu naplnit polymerem a proces opakovat. [1, 2, 3, 4]

2.1.3 Výhody rotačního natavování

Jednou z hlavních výhod metody rotačního natavování je možnost vyrábět širokou škálu dutých výrobků různých velikostí a tvarové složitosti. Od malých součástí o objemu několika centimetrů krychlových až po velké průmyslové nádrže o objemu desítek litrů či několikametrové lodě. Je také možné vyrobit plně uzavřené výrobky. [1, 2, 5]

Díky nízkému tlaku při výrobním procesu vznikají součásti s velmi malým zbytkovým vnitřním pnutím. Postupným natavováním polymeru na stěny formy také dochází ke vzniku izolační vrstvy a materiál má následně větší tendenci se uchyťovat v místech s menší tloušťkou stěny což přirozeně podporuje vznik rovnoměrné tloušťky stěny v celém výrobku. Vnější rohy mívají větší tloušťku,

to však může být považováno za výhodu, jelikož je tím zvýšena odolnost součástí proti opotřebení. Nastavením procesních parametrů a úpravou formy lze docílit i nerovnoměrného rozložení materiálu a tím vyztužit nejvíce namáhané části výrobku. [2, 3, 4, 5]

Další nespornou výhodou je, že pro výrobu stačí použití poměrně jednoduchých a levných forem a ohřívacích zařízení. Jelikož při procesu nevznikají žádné velké tlaky ani zatížení, mohou být formy relativně tenké, vyrobené například z plechu nebo odlité z hliníkových slitin. Formy pro rotační natavování je proto možné vyrábět rychle a mnohem levněji v porovnání například se vstřikováním či vyfukováním. [2, 3, 4, 5]

Na jednom stroji mohou být zároveň vyráběny součásti různých tvarů, velikostí, a dokonce i z různých materiálů, v některých případech dokonce i současně. Do součástí je možné zaformovat kovové inserty a zapéct loga a grafické prvky.

Změna barvy vyráběné součásti je snadná. Není zde potřeba zbavit se zbytku předchozího materiálu jako u vstřikování. Celkově využití materiálu je mnohem efektivnější, jelikož je použit veškerý materiál umístěný do formy. Odpad činí pouze části odebírané při dokončování. Při použití izolačních sekcí ve formě je možné docílit, že se v daném místě materiál na stěnu formy nenataví vůbec, nebo pouze ve velmi tenké vrstvě. [2, 5]

2.1.4 Nevýhody rotačního natavování

Forma je běžně nahřívána z pokojové teploty na teplotu tavení použitého polymeru a následně opět chlazena na teplotu okolí. V důsledku toho je výrobní cyklus delší než u vstřikování a vyfukování. Zejména u velkých sérií výrobků menších rozměrů proto nemůže rotační natavování těmto technologiím konkurovat. [2, 3, 5]

Počet materiálů použitelných pro rotační natavování je menší v porovnání s jinými procesy a jejich cena bývá vyšší, jelikož je potřeba, aby byl v podobě jemného prášku, a ne levněji vyrobitelného granulátu. [2, 5]

Vyndávání hotových částí z formy a její opětovné plnění a příprava bývá časově náročná a obtížně automatizovatelná práce, zejména u tvarově komplexnějších výrobků. Je potřeba formu pravidelně čistit a separovat, aby materiál nezůstal ve formě přitaven i po vychladnutí. Dále příprava často zahrnuje našroubování insertů, nalepení log a grafických prvků. [2]

Do vyráběných součástí je velmi náročné touto technologií vytvořit žebra pro vyztužení. Obtížná je také výroba velkých rovných ploch z důvodů jejich zvlnění při chladnutí. Vnitřní povrch součástí je vytvářen volně. Není tedy možné zajistit jeho velkou rozměrovou přesnost. Při chladnutí se součást volně smršťuje ve formě, a proto může být náročné přesně předvídat finální rozměry výrobku. [2]

Kontrola průběhu procesu je znesnadněna podstatou této technologie, což je rotace celé formy. V důsledku ní je náročné umístit do výrobního zařízení senzory pro sledování průběhu tavení a chladnutí polymeru uvnitř formy. V dnešní době však již tato limitace postupně mizí díky možnosti použití bezdrátových měřících senzorů. [3]

2.1.5 Druhy výrobních zařízení

Vzhledem k velmi široké škále rozličných výrobků, které mohou být zhotovovány metodou rotačního natavování, existuje také nespočet různých druhů výrobních zařízení k tomu užívaných. Jelikož jsou tato zařízení v principu poměrně jednoduchá, firmy si často samy mohou zhotovit taková, která přesně vyhoví jejich požadavkům a vyráběnému sortimentu. Obecně je třeba aby stroj zvládl formou s materiálem otáčet, ohřát ji, ochladit a následně aby bylo možno formu pohodlně otevřít, vyjmout výrobek a znovu ji naplnit. [2, 5]

Způsob ohřevu musí být navržen tak, aby docházelo k rovnoměrnému prohřívání celého prostoru v okolí formy. Jedině tak lze docílit rovnoměrného rozložení materiálu ve finálním výrobku. K ohřevu může být využit například:

- Horký vzduch
- Přímý ohřev plamenem
- Elektrický ohřev
- Infračervené záření
- Mikrovlnné záření
- Horký olej

U chlazení je stejně jako u ohřevu kladen důraz zejména na rovnoměrný průběh v celém objemu výrobku. Na správné rychlosti a rovnoměrnosti ochlazování závisí výsledná kvalita a rozměrová stabilita vyráběné součásti. Pro větší efektivitu výroby bývá chlazení prováděno v samostatné komoře, aby mohla být forma v peci rovnou nahrazena novou, čímž může být celkový výrobní čas zkrácen i na polovinu. U některých zařízení může být forma chlazená přímo v peci. Tato zařízení mají výhodu v menších prostorových nárocích a jednodušší konstrukci. Pro chlazení bývá nejčastěji využíván vzduch případně voda. Ostřikování vodou je velmi účinné, je však nutné ohlídat její rovnoměrnou distribuci na povrch součásti. Příliš rychlé zchlazení může mít za následek vznik nerovnoměrné krystalické struktury stěny, a tudíž zvlnění či nesymetrické smrštění výrobku. Zvláště náchylné jsou k tomu tenké formy s nižší tepelnou kapacitou. Proto se voda aplikuje ve formě co nejjemnějších kapiček, které vytvoří vodní mlhu kolem chlazené formy. Při použití vzduchu jako chladicího média tento problém není tak výrazný, doba chlazení je však znatelně delší. Časté je proto použití nejprve vzduchu a následně vodní mlhy. [2, 6]

2.1.5.1 Stroj typu *Rock-and-Roll*

Název z anglických sloves *to rock* – houpat a *to roll* – valit, dobře vystihuje hlavní odlišnost tohoto zařízení. Místo obvyklé rotace formy o 360° ve dvou na sebe kolmých osách, je zde jedna rotace nahrazena kývavým pohybem. Zpravidla se jedná o kývání podél kratší z os výrobku a rotace kolem delší. Hlavní předností tohoto typu výrobního zařízení, je jeho jednodušší

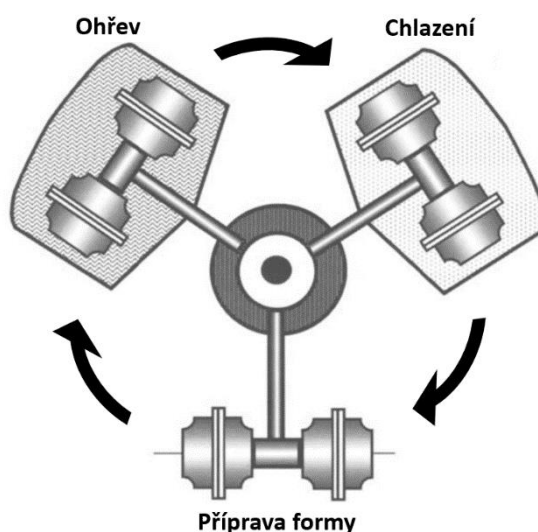
konstrukce oproti zařízení, která musejí zároveň zajistit dvě úplné rotace. Rychlost rotace bývá nízká (okolo čtyř otáček za minutu) a úhel kývání do 45° na každou stranu od vodorovné polohy. Kývavý pohyb často vykonává celá ohřívací komora. Na **obrázku 2a** je zobrazeno jedno z nejjednodušších konstrukčních řešení zařízení pro rotační natavování. Sestává pouze z kývného rámu, na kterém je umístěna rotující forma. Ta je zespodu nahřívána plynovými hořáky. Toto řešení je však použitelné pouze pro rotačně symetrické výrobky, jelikož vzdálenost hořáků od formy musí být konstantní, aby docházelo k rovnoměrnému ohřevu. Při použití uzavřené pece (příklad na **obrázku 2b**) lze díky nahřívání celého prostoru kolem formy dosáhnout rovnoměrnějšího ohřívání celého jejího povrchu neohledě na její tvar. Dále na tomto obrázku můžeme vidět stanoviště pro chlazení formy mimo pec pomocí větráků. Stroje typu Rock-and-Roll jsou nejčastěji používány pro výrobu vodních nádrží a podlouhlých výrobků jakými jsou například kánoe a kajaky. [2, 6, 9]



Obrázek 2: a) (vlevo) Stroj typu Rock-and-Roll s otevřenou konstrukcí a ohřevem pomocí plynových hořáků. b) (vpravo) Stroj s uzavíratelnou ohřívací komorou a zvlášť stanovištěm pro chlazení. [7, 8]

2.1.5.2 Stroj typu *Karusel*

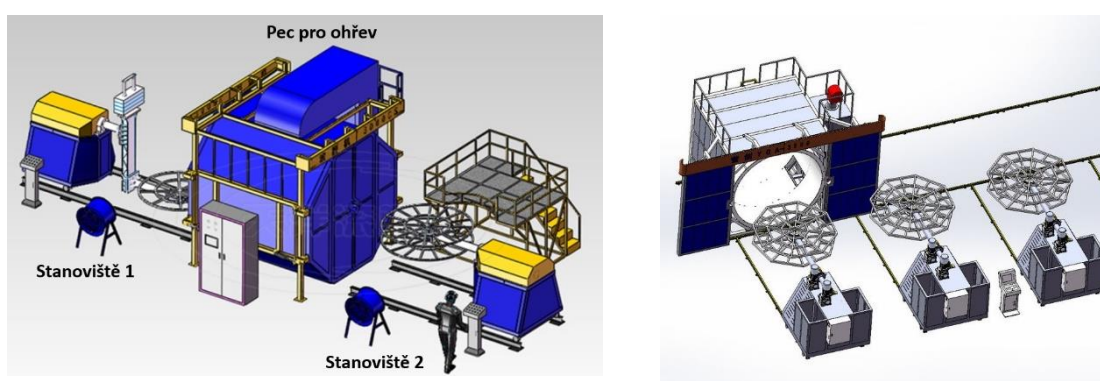
V dnešní době je Karusel jedním z nejpoužívanějších druhů zařízení pro tuto technologii. Jednodušší stroje tohoto typu používají tři ramena připevněná k centrální otočné věži, která jsou od sebe otočena o úhel 120° . Zároveň jsou zde tři stanoviště, taktéž rozmístěna po 120° - ohřev, chlazení a servisování (schéma na **obrázku 3**). Díky odděleným stanovištím a snadnému přesunu mezi nimi, dochází k lepšímu využití času stroje. Je možné připravovat formu k další tavně, zatímco jeden výrobek je již v peci a druhý chladne. V případě, že je potřeba prodloužit jednu z operací (nejčastěji chlazení či přípravu) může být použit stroj se čtyřmi rameny a tuto operaci rozdělit na dvě. Jednotlivá ramena mohou nést formy různých tvarů, a dokonce i naplněné různým materiálem. V takovou chvíli je však doba výrobního cyklu omezena nejpomalejším dílem. Tento problém řeší o něco složitější konstrukční řešení, kdy nejsou jednotlivá ramena vzájemně pevně ukotvena, ale jejich pohyb je možné realizovat samostatně. Takové stroje využívají několika takových ramen a k tomu více stanovišť, než je počet ramen. Stanovištím pak může být přiřazena funkce podle potřeb výroby. [2, 6, 9]



Obrázek 3: Schéma stroje typu *karusel* se třemi pevně uloženými rameny. Převzato a upraveno z [6]

2.1.5.3 Stroj typu Shuttle

Stroje typu shuttle (v překladu kyvadlová doprava či tkalcovský člunek) využívají několika nezávislých ramen s připevněnou formou, která jsou přesouvána (často pomocí kolejnic) mezi pecí a stanovištěm pro chlazení a přípravu forem. Tento typ zařízení má poměrně nízké zástavbové nároky a může být použit v mnoha různých konfiguracích. Na **obrázku 4a** je příklad zařízení se dvěma rameny proti sobě a na **obrázku 4b** je sestavení s pojízdnou pecí. [2, 6, 9]



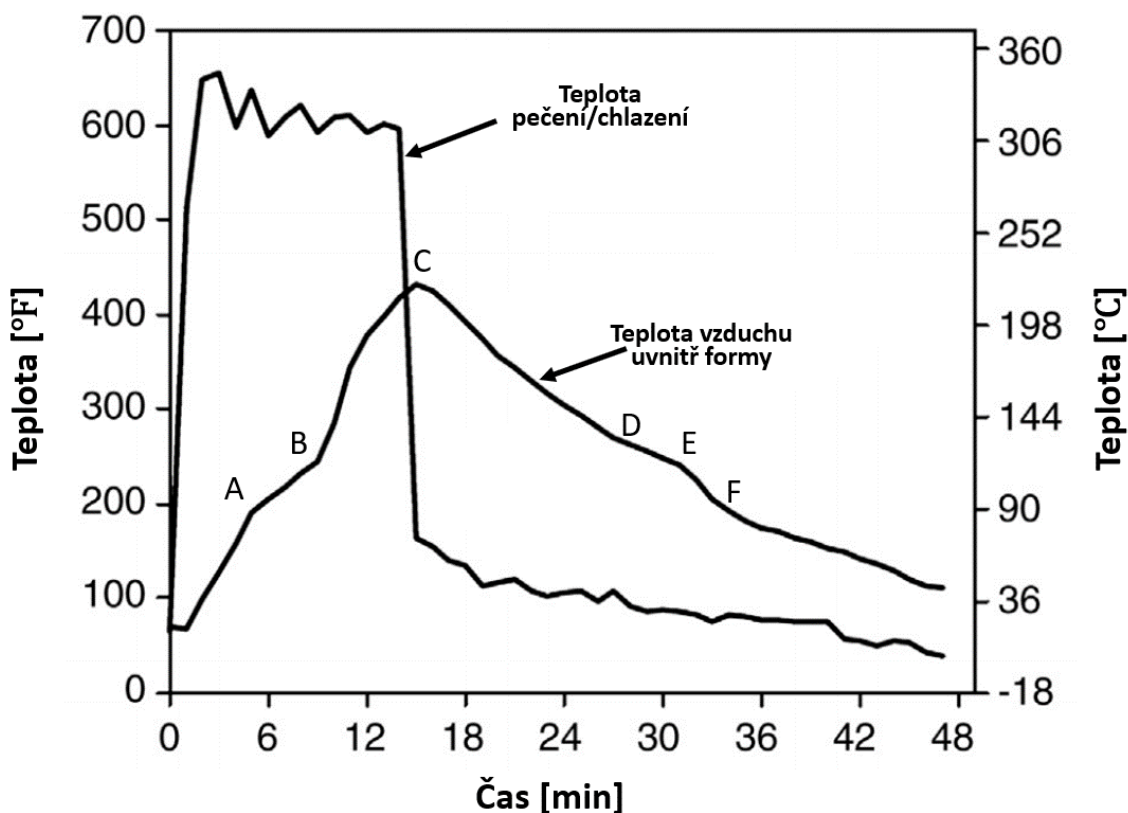
Obrázek 4: a) (vlevo) Zařízení typu Shuttle se dvěma stanovišti. b) Uspořádání s pojízdnou pecí. [10, 11]

2.1.6 Procesní parametry rotačního natavování

Kvalita a výsledné vlastnosti výrobku jsou ovlivněny správným nastavením parametrů výrobního procesu. Těmi hlavními jsou teplota v peci, čas pečení a rychlost ochlazování. Pokud je čas pečení příliš krátký, nebo teplota v peci příliš nízká, pak neproběhne úplné slinutí polymeru. Výsledkem bude výrobek se zhoršenou tuhostí, pevností a tvrdostí. Dojde-li naopak k přehřátí materiálu, bude výsledný produkt křehký.

Dříve byly procesní parametry zjišťovány převážně metodou pokus – omyl a podle firemního know how. V dnešní době můžeme díky novějším technologiím lépe sledovat celý proces pomocí senzorů a získané údaje využít pro optimalizaci procesních parametrů. Z naměřených teplot v peci

a teplotu vzduchu uvnitř formy v průběhu pečení můžeme sestavit termogram zobrazený na **obrázku 5**. [5]



Obrázek 5: Příklad termogramu získaného při rotačním natavování polyethylenu, převzato a upraveno z [2]

Termogram znázorňuje průběh teploty vzduchu měřené uvnitř formy a teploty uvnitř pece. Při porovnání obou křivek je zřejmé, že křivka průběhu teploty mimo formu nemá kromě přechodu mezi ohříváním a chlazením příliš souvislost s průběhem teploty uvnitř. Pro podrobnější sledování, co se děje s materiálem v průběhu procesu je tedy výhodnější se zaměřit především na teplotu vzduchu uvnitř formy.

Vložený materiál se z počátku pouze přesypá na dně formy. Po nahřátí na teplotu **A** se začíná prášek polymeru tavit a přichycovat na stěny formy. V tomto bodě můžeme pozorovat zpomalení rychlosti růstu teploty. Tavicí se polymer totiž absorbuje část dodávaného tepla. Zároveň vzniká na vnitřním povrchu formy vrstva již nataveného plastu, která působí jako izolant, a zpomaluje ohřívání vzduchu uvnitř formy. V bodě **B** je již veškerý použitý prášek roztaven (rychlost

ohřívání se tedy opět zvyšuje) a přilnut na stěny. Tavenina je však zatím velmi nehomogenní a obsahuje mnoho bublin. Mezi bodem **B** a **C** probíhá slinování a zhutnění. Bod **C** reprezentuje maximální dosaženou teplotu, která má velký vliv na výsledné vlastnosti výrobku. Vlivem setrvačnosti ohřívání se tato teplota projeví až nějakou dobu po ukončení ohřívání, v závislosti na materiálu formy a tloušťce stěny výrobku. Běžně může teplota stoupnout ještě o 10–20 °C. Rychlost ochlazování závisí na zvoleném způsobu chlazení. Většinou je výhodnější pozvolné chlazení vzduchem, které výrazně omezí pokřivení výrobku vlivem nerovnoměrného smrštění. Rychlost ochlazování také ovlivňuje mikrostrukturu a tím i mechanické vlastnosti výrobku. Při pozvolném chladnutí je u semikrystalických materiálů podporován růst sférolitů tudíž dosažen vyšší stupeň krystalinity. Naopak prudkým zchlazením získáme strukturu obsahující mnoho velmi malých sférolitů. Vliv rychlosti ochlazování na vlastnosti materiálu jsou popsány v **tabulce 1**. Proces vzniku krystalické struktury je doprovázen uvolňováním energie, to je pozorovatelné v bodě **D** snížením rychlosti ochlazování. Bod E značí ukončení krystalizace a zrychlení chladnutí. Opětovné zpomalení chladnutí v bodě F je připisováno vzduchovým kapsám mezi formou a stěnou výrobku vzniklých v důsledku jeho tepelného smršťování a sloužících jako izolační vrstva. [2, 3, 4, 5, 6, 9]

Tab. 1: Vliv snížení rychlosti chlazení [5, 9]

Velikost sférolitů	Větší
Kvalita a stupeň krystalinity	Vyšší
Modul pružnosti	Vyšší
Rázová houževnatost	Nižší
Prodloužení při přetržení	Výrazně nižší

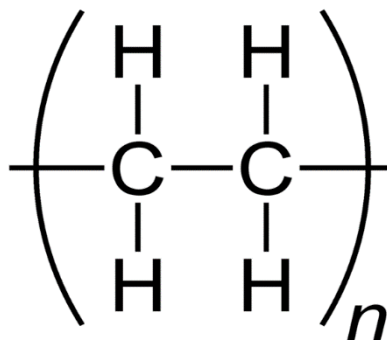
2.1.7 Požadavky na materiály

Metoda rotačního natavování je charakteristická dlouhou výdrží na teplotě tavení použitého polymeru v porovnání s jinými technologiemi zpracování plastů. Tento fakt je potřeba zohlednit i při výběru materiálu, chceme-li zajistit požadované vlastnosti vyráběné součásti. Je tedy nutné volit materiály s dobrou teplotní stabilitou, aby nedocházelo k jejich degradaci v průběhu tavení. Většina materiálů pro rotační natavování je proto stabilizována pomocí antioxidantů.

Dalším důležitým kritériem je Index toku taveniny MFI (Melt Flow Index). Ten popisuje viskozitu taveniny daného materiálu. Jedná se o normalizovanou zkoušku (ISO 1133) udávající množství taveniny, které proteče tryskou za 10 minut při daném zatížení a teplotě. Může být měřen buď objemový index toku taveniny MVR (Melt Volume Rate) [$\text{cm}^3/10 \text{ min}$] nebo hmotnostní index toku taveniny MFR (Melt Flow Rate) [$\text{g}/10 \text{ min}$]. Čím je hodnota indexu vyšší, tím materiál ochotněji teče a je tedy schopen lépe pokrývat stěny formy a lépe slinout. S rostoucím indexem ovšem klesá délka makromolekul, což negativně ovlivňuje některé vlastnosti jako je například pevnost, tuhost, modul pružnosti, rázová houževnatost a chemická odolnost. Hodnoty MFI pro polyethyleny běžně využívané pro rotační natavování se pohybují v rozmezí 2–8 g/10 min. [2, 12, 13, 15]

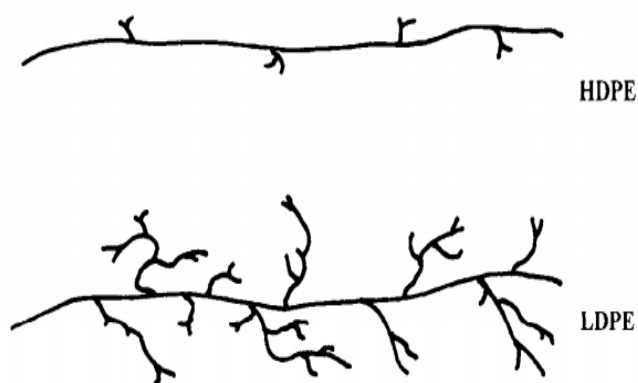
2.1.8 Polyethylen

Polyethyleny jsou zdaleka nejpoužívanějším materiálem pro rotační natavování. Zaujímají více než 90 % trhu. Svoje postavení si drží zejména díky velmi dobré teplotní stabilitě, snadnému zpracování a ceně. Polyethylen vzniká polymerací ethenu (strukturní vzorec PE na **obrázku 6**). Za běžných podmínek je bílý. [2, 16]



Obrázek 6: Strukturální vzorec Polyethylenu [14]

Nejčastěji bývá polyethylen rozdělován podle hustoty, a to na nízko hustotní LDPE (z anglického Low Density Polyethylene) a vysoko hustotní HDPE (z angl. High Density PE). Hustota polymeru závisí především na tvaru makromolekul (zobrazeno na **obrázku 7**). Lineární makromolekuly se mohou těsněji poskládat, čímž vznikne polymer s vyšší hustotou. Čím rozvětvenější makromolekula, tím nižší bude hustota výsledného polymeru. Změna vlastností v závislosti na hustotě je znázorněna v **tabulce 2**. Přechod mezi LDPE a HDPE není jasně stanoven. Často se proto používá také označení polyethylen se střední hustotou MDPE (Medium Density PE). [2, 15, 16]



Obrázek 7: Tvar makromolekul vysokohustotního a nízko hustotního polyethylenu. [15]

Tab. 2: Vliv rostoucí hustoty polyethylenu na jeho vlastnosti [15]

Chemická odolnost	Vzrůstající
Tvrдость	Vzrůstající
Rázová houževnatost	Klesající
Pevnost v tahu	Vzrůstající
Tuhost	Vzrůstající
Bariérové vlastnosti	Vzrůstající
Creepová odolnost	Vzrůstající
Smrštění	Vzrůstající
Transparentnost	Klesající

Kromě tvaru makromolekul ovlivňuje vlastnosti PE také jejich molekulová hmotnost. Můžeme tak rozlišovat polyethyleny s nízkou, vysokou a velmi vysokou molekulární hmotností. S rostoucí molekulovou hmotností se zvyšuje teplota tavení a hustota.

Polyethyleny mají obecně dobrou chemickou odolnost, která stoupá se zvyšující se krystalinitou. Velmi dobře odolávají vodě, kyselinám, zásadám a polárním rozpouštědlům. Hůře jsou na tom s odolností proti nepolárním rozpouštědlům, zvláště za zvýšené teploty. Dále polyethyleny dobře odolávají nízkým teplotám zhruba do $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a zachovávají si tvar až do teplot kolem $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. [2, 15, 16]

2.1.9 Kvalita součásti

Na výsledných vlastnostech výrobku zhotoveného metodou rotačního natavování se podílí mnoho různých faktorů. Již zmiňovanými jsou například zvolený materiál a nastavení parametrů výrobního procesu. Ačkoli je rotační natavování na první pohled jednoduchou technologií, prochází polymer při výrobě poměrně složitým a těžko monitorovatelným procesem co se týče přestupu tepla a toku materiálu. Dosažení optimálních vlastností výrobku vyžaduje nalezení rovnováhy mezi jednotlivými faktory, ovlivňujícími výrobní proces, často metodou pokus-omyl. [17]

Špatně zvolené procesní parametry lze někdy poznat na první pohled již po vyjmutí výrobku z formy. Pokud má vnitřní strana výrobku hrubý povrch je zřejmé, že doba pečení byla příliš krátká a částice polymeru neměly dostatek času pro slynutí. Je-li vnitřní povrch velmi lesklý, doplněný o štiplavý zápach, byla zvolená doba pečení naopak příliš dlouhá a došlo k degradaci materiálu. K degradaci dochází nejdříve na vnitřní straně součásti za současného působení kyslíku a vysoké teploty. Přepečený materiál má kromě vysokého lesku také zažloutlou barvu (zobrazeno na **obrázku 8**).[5]

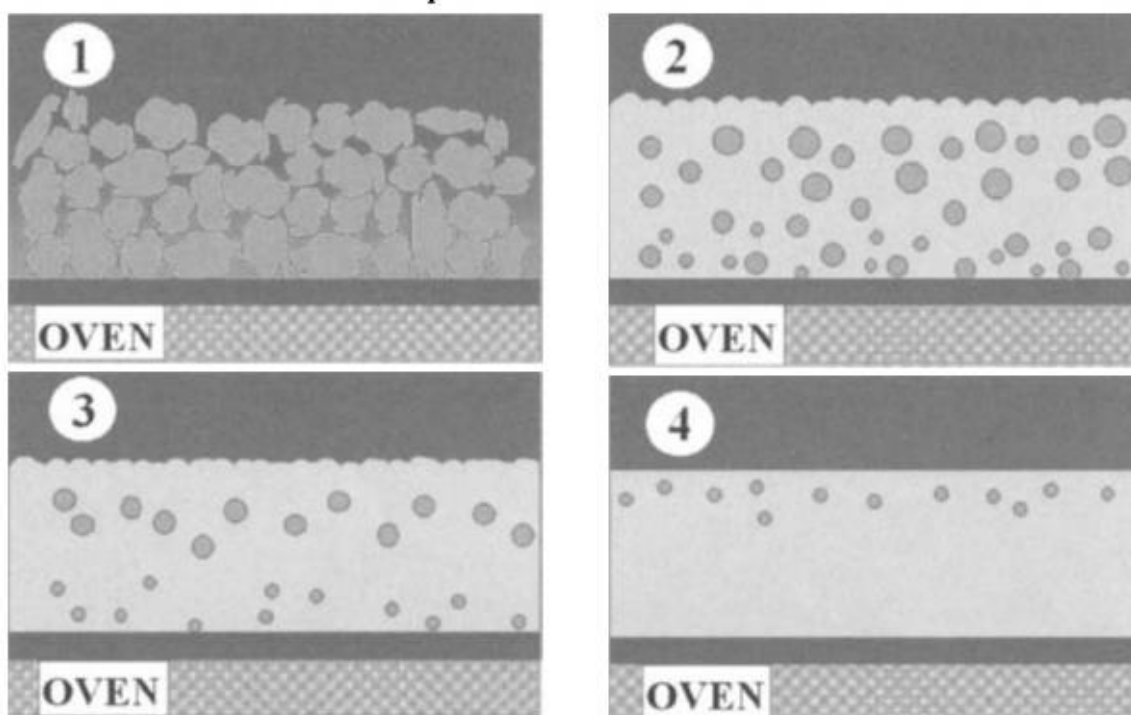


Obrázek 8: Porovnání přepečeného materiálu (vlevo) a správně připraveného (vpravo), vnitřní stěna vzorku.

Velký vliv na výslednou kvalitu výrobků mají bublinky, jejichž tvorba v průběhu procesu je pro rotační natavování typická. Jejich výskyt ve stěně výrobku může negativně ovlivnit jeho mechanické vlastnosti. Bublinky blízko u povrchu zas vytvářejí porozitu, která má neblahý vliv na estetickou stránku výrobku případně jeho hygienické vlastnosti. Tento druh povrchových bublin je nazýván „pin holes“ (z anglického pin – špendlík, hole – díra).

2.1.9.1 Mechanismus vzniku vzduchových bublin

Postup tvorby vzduchových bublinek v materiálu je vidět na **obrázku 9**.



Obrázek 9: Fáze vzniku vzduchových bublin. Převzato z [6]

V první fázi, kdy je polymer stále ještě ve formě prášku, proudí v mezerách mezi jednotlivými částicemi vzduch. Se zvyšující se teplotou dochází postupně k natavování prášku a jednotlivé částice se v místě styku začínají spojovat. Po určité době dojde k vytvoření třídimenzionální struktury, ve které zůstanou vzduchové kapsy uvězněny (fáze 2). S postupem času se tyto bubliny rozpouští do materiálu (fáze 3 a 4). Kvalita materiálu hraje velkou roli v procesu tvorby bublin. Špatně namletý prášek, který obsahuje nepravidelné, zvláště pak podlouhlé částice, vytváří větší vzduchové kapsy, což má za následek vznik bublin s větším průměrem. Podobný efekt má použití hrubě namletého materiálu. [4, 6, 17, 18, 19]

2.1.9.2 Mechanismus odstranění vzduchových bublin

Bubliny vzduchu nemohou „vylout“ na povrch taveniny, protože její viskozita je příliš vysoká. Zůstávají proto na místě svého vzniku. Při dostatečně vysoké teplotě se následně začne uvězněný vzduch rozpouštět do okolního

materiálu. Nejprve dojde k rozpuštění části kyslíku, jelikož má zhruba dvojnásobnou rozpustnost v polyethylenu vůči dusíku. Vlivem povrchového napětí dojde k zmenšení poloměru bubliny, vzroste vnitřní tlak a dojde k rozpuštění části dusíku. Tento proces se několikrát opakuje a při dostatečně dlouhém ohřevu dojde k úplnému odstranění bublin z taveniny.

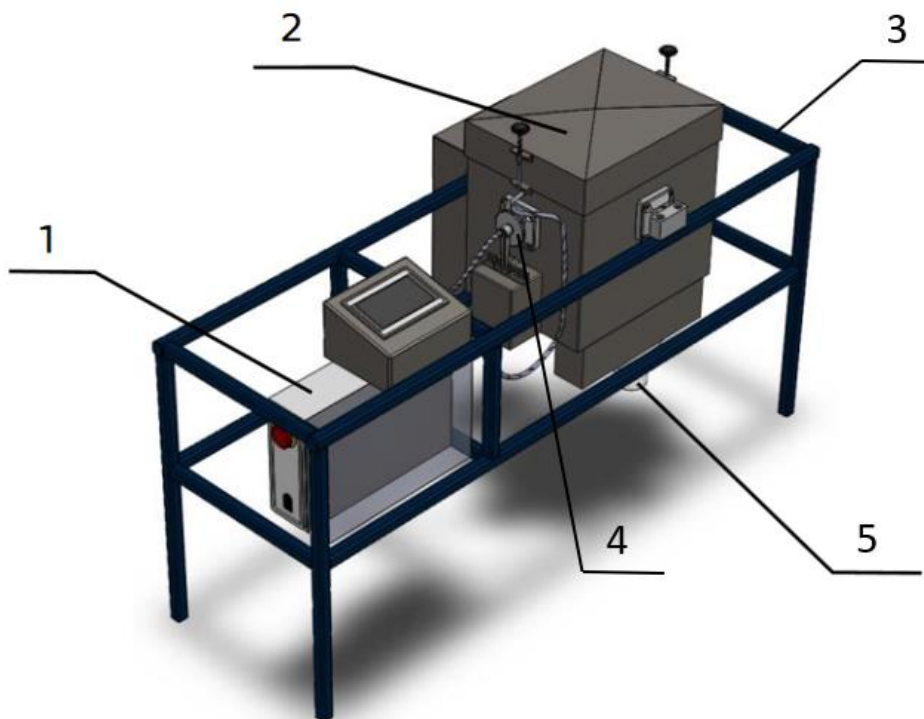
Přítomnost bublin ve stěně výrobku bývá občas používána jako indikátor kvality. Pokud se na řezu stěnou nachází mnoho bublin v celé ploše řezu, je daný výrobek pravděpodobně „nedopečený“. Pokud na řezu naopak nejsou žádné bubliny, může to značit „přepečení“ materiálu, jelikož po odstranění všech bublin z taveniny započíná proces degradace polyethylenu. Za indikátor optimálně připraveného výrobku bývá považován výskyt malého množství bublin v blízkosti vnějšího povrchu výrobku. Rychlost rozpouštění bublinek do taveniny závisí zejména na jejich počáteční velikosti. Ta je ovlivněna velikostí a tvarem částic použitého materiálu. Větší částice polyethylenu mají za následek vznik větších bublin, které se rozpouštějí znatelně déle. Rozpouštění bublin můžeme urychlit také zvýšením tlaku uvnitř formy v průběhu tavení poté, co dojde k roztavení veškerého použitého prášku. K tomuto účelu postačí velmi nízký přetlak (okolo 0,5 baru). Tlak uvnitř formy zároveň zvýší tlak uvnitř jednotlivých bublinek a tím urychlí jejich rozpuštění do okolního materiálu. Použitím této metody je možné značně snížit výrobní čas, avšak vyžaduje použití konstrukčně složitějších forem.

S rostoucím počtem bublin ve stěně znatelně klesá maximální rázová energie jak u vzorků měřených při pokojové teplotě, tak u hluboko podchlazených (-40 °C). Přítomnost bublin snižuje energii potřebnou k inicializaci a následnému šíření trhliny. Ta má tendenci sledovat cestu nejmenšího odporu, kterou tvoří právě tato místa chybějícího materiálu. Záleží také na velikosti bublin. Větší bubliny podporují tvorbu a šíření trhliny v materiálu více než větší množství bublin o menším poloměru. [4, 5, 6, 17, 18, 19]

3 Praktická část

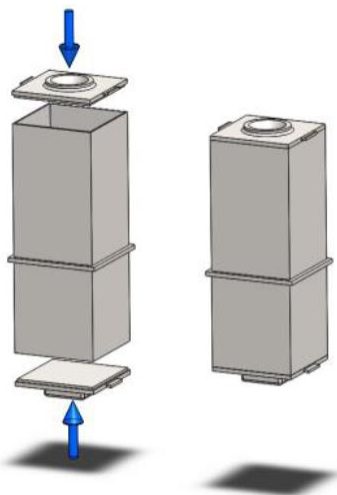
3.1 Zkušební zařízení

K přípravě vzorků byla použita pírka pro rotační natavování v laboratořích Ústavu Materiálového inženýrství FS ČVUT. Jedná se o jednoduchý výrobní stroj typu Rock and Roll (forma rotuje kolem delší osy a kývá se kolem kratší) viz **obrázek 10**. Pec (2) je kývána v rámu (3). Uvnitř pece se nachází odporová topná tělesa a forma rotující kolem osy kolmé na osu kývání.



Obrázek 10: Části výrobního stroje: (1) řídicí a ovládací panel, (2) pec s formou, (3) rám, (4) čidla teploty vzduchu ve formě a v peci, (5) ventilátor pro chlazení

Forma je zhotovena z hliníkového profilu čtvercového průřezu s vnitřními rozměry 96 x 96 x 160 mm. Konce jsou zavřeny frézovanými víky, z nichž jedno má v sobě otvor pro vsunutí teplotního čidla pro monitorování teploty uvnitř formy. Forma je zobrazena na **obrázku 11**.



Obrázek 11: Sestavení formy s víky

3.1.1 Příprava formy

Formu je před použitím nutné pečlivě očistit a zbavit jakýchkoli nežádoucích částic. Například prachu nebo připečeného materiálu z předchozího používání. Je také potřeba formu pravidelně ošetřovat separačním činidlem, aby vzorek nezůstal přichycený na stěny formy, a bylo jej možné po upečení snadno vyjmout. Činidlo není nutné aplikovat před každým výrobním cyklem. Pouze pokud při předchozím vyndávání nešel vzorek hladce vytáhnout.

Po očištění a případně separaci formy, je dovnitř nasypáno odvážené množství materiálu. V našem případě bylo použito 200 g vysoko hustotního polyethylenu SURPASS s označením RMs245-U(UG) od firmy NOVA Chemicals. Výsledná tloušťka stěny se pohybovala okolo 3,5 mm. Po naplnění je forma uzavřena a vložena do pece.

3.1.2 Pracovní cyklus

Pracovní cyklus zařízení můžeme řídit buď ručně, nebo nastavením automatického režimu. V ručním režimu můžeme přímo ovládat teplotu v peci, zapínat/vypínat otáčení formy, kývání pece, topení a chlazení (ventilátor). Pro přípravu vzorků byl použit automatický režim, díky kterému jsme schopni dosáhnout lepší opakovatelnosti procesu.

Řízení je realizováno pomocí dvou teplotních čidel. Jedno měří teplotu vzduchu uvnitř pece (mimo formu). Druhé měří teplotu vzduchu uvnitř formy. Kromě těchto dvou teplot nastavujeme, při jaké teplotě v peci má být spuštěna rotace a kývání, při jaké teplotě je ukončen ohřev a kdy zapnuto chlazení. Použité parametry pro přípravu vzorků jsou znázorněny v **tabulce 3**.

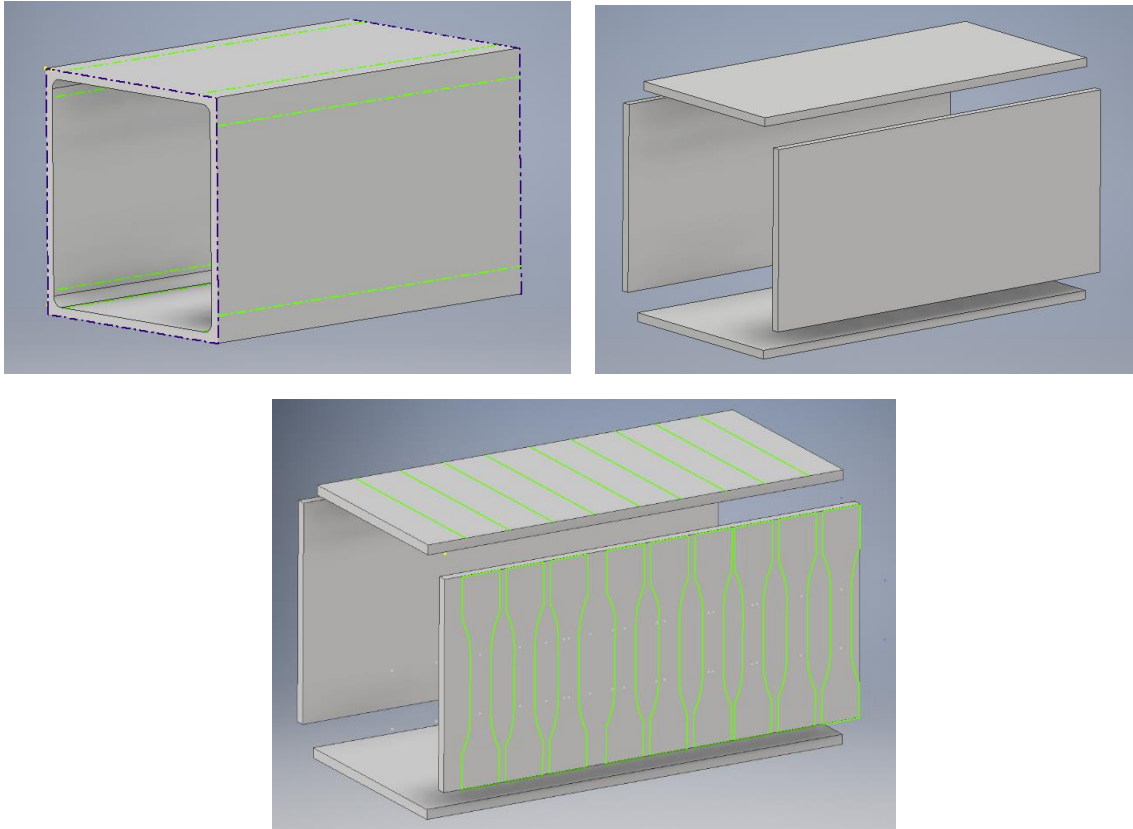
Tab. 3: Použité parametry automatického procesu pro přípravu vzorků

Teplota v peci	250 °C (270 °C pro vzorek pečený do teploty 250 °C ve formě)
Start rotace při	100 °C v peci
Start kývání při	110 °C v peci
Ukončení ohřevu při	170–250 °C ve formě
Chlazení	60 s, začátek při 110 °C ve formě

Dále je možno nastavit maximální čas pečení při jehož dosažení dojde k ukončení ohřevu, nebylo-li dříve dosaženo požadované teploty ve formě. Další parametry jako je rychlost rotace, změna směru rotace po určité době, úhel výkyvu, zpomalení a zastavení v úvrati jsou otestovány pro daný typ formy a nebyly proto měněny.

3.2 Příprava vzorků

Metodou rotačního natavování bylo připraveno celkem čtrnáct polyethylenových kvádrů, každý s jinou maximální dosaženou teplotou uvnitř formy. Ty byly následně rozřezány, a ze stěn kvádrů připraveny vzorky pro jednotlivé zkoušky (**obrázek 12**). Tloušťka stěny vzniklé při rotačním natavování závisí na tvaru součásti. Toto je názorně vidět například v rozích, kde na vnitřní straně kvádrů vzniká zaoblení, a tudíž odlišná tloušťka stěny než ve zbytku součásti. Proto byla zkušební tělíska rozmístěna tak, aby jejich středy (část, která bude zkoumána) byly umístěny v místě nejméně ovlivněné tímto jevem.



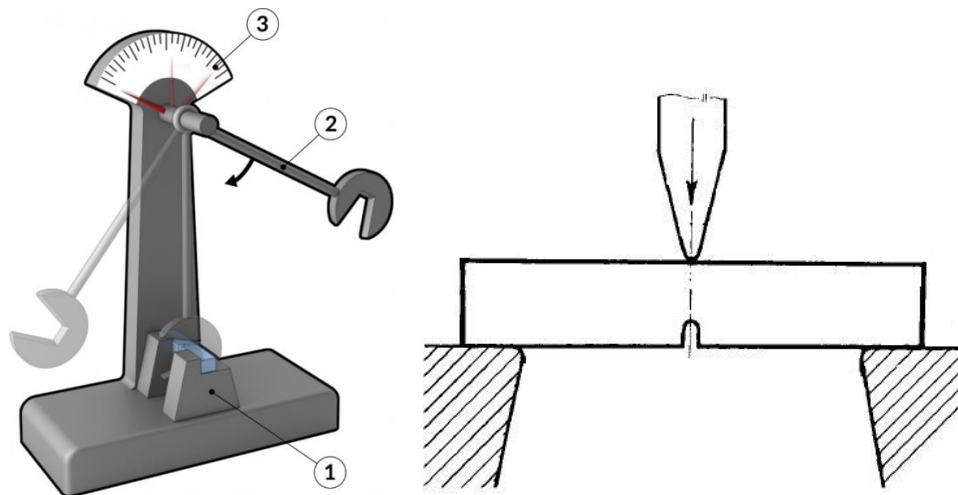
Obrázek 12: Rozdělení polyethylenového kvádrů na stěny a vytvoření zkušebních tělísek.

3.3 Zkouška rázem v ohybu

Rázová houževnatost byla stanovena pomocí metody Charpy. Tato zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 179-1. [20] Houževnatost je charakterizována množstvím energie potřebné k přeražení zkušebního tělesa. Proces přeražení můžeme rozdělit na dvě fáze, iniciace trhliny a šíření trhliny až do úplného přelomení. U metody Charpy je vznik trhliny zajištěn pomocí vrubu vyrobeného před zkouškou do tělesa. Dle normy byly vzorky opatřeny vrubem tvaru V tak, aby pod vrubem zůstávala výška 8 mm.

Schéma zkušebního zařízení a umístění zkoušeného tělíska je na **obrázku 13**. Číslice (1) označuje opěru, na níž je umístěno zkoušené tělíska tak, aby kladivo po uvolnění narazilo do neporušené strany vzorku, přímo proti vytvořenému vrubu. Kladivo má ve výchozí poloze (2) známou potenciální energii, danou jeho hmotností a délkou ramene na kterém je umístěno. Po jeho uvolnění dojde

k promáchnutí, kladivo přerazí vzorek a pokračuje dále. Ručička nám poté na stupnici (3) ukáže hodnotu energie spotřebované na přeražení vzorku. [21, 22]



Obrázek 13: **vlevo** – Schéma Charpyho kladiva 1) Opěra pro zkoušené tělísko 2) Kladivo ve výchozí poloze 3) Stupnice pro odečtení spotřebované energie
vpravo – umístění zkoušeného tělíska vůči směru úderu kladiva [21, 22]

Pro porovnání výsledků je nutné vztáhnout naměřenou energii na plochu pod vrubem viz rovnice níže. Proto byl před zlomením každý vzorek pečlivě proměřen. Rázová houževnatost Charpy zkušebních těles opatřených vrubem a_{cN} vyjádřená v Joulech na milimetr čtvereční se vypočte:

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \quad [J/mm^2] \quad (1)$$

Kde

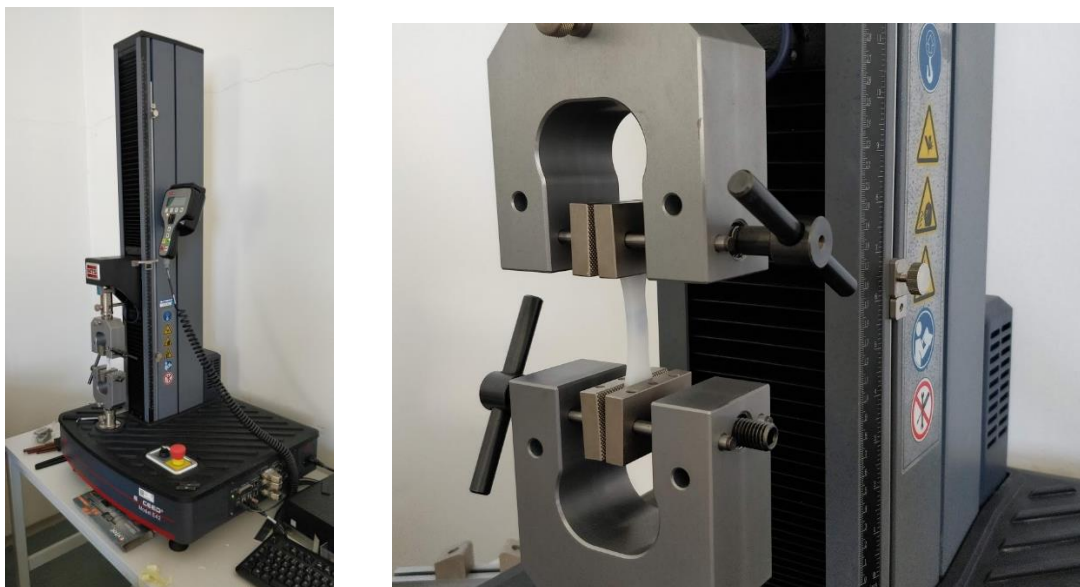
E_c je energie v joulech spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa

h tloušťka zkušebního tělesa v milimetrech

b_N šířka zkušebního tělesa pod vrubem v milimetrech

3.4 Zkouška tahem

Zkouška tahem plastů je popsána normou ČSN EN ISO 527-1 a 527-2. Princip této zkoušky spočívá v upnutí zkoušeného tělesa mezi dvě čelisti univerzálního trhacího stroje (**obrázek 14**) a jejich postupné oddalování – natahování vzorečku. Postupné zvyšování osově síly působící na vzorek je zaznamenáváno, a společně s deformací vzorku vynášeno jako závislost do pracovního tahového diagramu.



Obrázek 14: Trhací stroj EXCEED E42 firmy MTS, který byl použit k provedení tahové zkoušky. Vpravo detail čelistí s upnutým zkušebním tělískem.

Z průběhu této zkoušky jsme schopni zjistit mnoho užitečných materiálových parametrů jako jsou například: napětí na mezi pevnosti σ_m (2), napětí na mezi kluzu σ_y (3), napětí při přetržení σ_b a modul pružnosti E .

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{h \cdot b} \quad [Mpa] \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A} = \frac{F_y}{h \cdot b} \quad [Mpa] \quad (3)$$

Kde

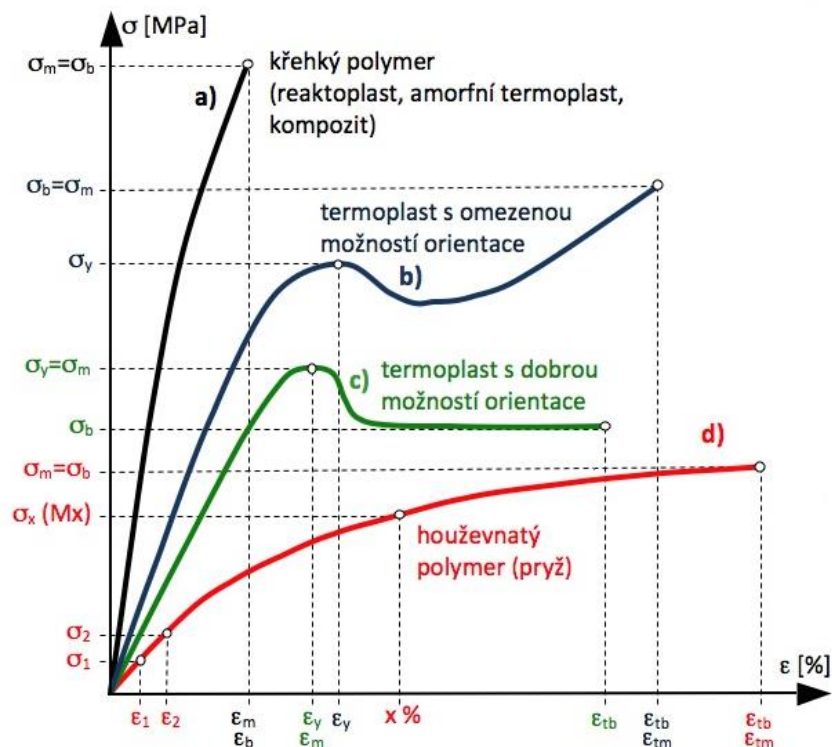
F_{max} je první lokální maximum pozorované v průběhu tahové zkoušky [N]

F_y je síla na mezi kluzu [N]

A je počáteční průřez zkušebního tělesa [mm²]

h, b tloušťka a šířka zkušebního tělesa [mm]

Pokud vyneseme závislost průběhu napětí σ a poměrného prodloužení ϵ , získáme deformační křivky (**obrázek 15**).



Obrázek 15: Deformační křivky pro různé druhy polymerů [24]

Mechanické vlastnosti polymerů jsou velmi výrazně závislé na podmínkách prováděné zkoušky. Zejména teplota zkušebního tělíska (potažmo okolní teplota) a rychlost zatěžování mají významný vliv na naměřené hodnoty. Je tedy nezbytné zajistit, aby v průběhu zkoušky byly tyto proměnné, pokud možno konstantní.

Zkoušené polymerové tělísko je do trhacího stroje upínáno pomocí dvou čelistí, které sevřou konce vzorku. Je proto vhodné volit tvar tělíska s rozšířenými konci (tzv tvar lopatek případně psí kosti), který umožňuje dostatečně pevné uchycení vzorku, aby nemohlo dojít k jeho prokluzu v čelistech a zároveň nedošlo k narušení a přetržení vzorku přímo u čelisti. Napětí je koncentrováno do zúžené části vzorku. Zkušební tělíska byla vyrobena pomocí vystřihovacího nástroje (**obrázek 16**) za použití ručního hydraulického lisu. [22, 23]



Obrázek 16: Vlevo vystřihovací nástroj. Vpravo připravená zkušební tělíska pro zkoušku tahem.

3.5 Pozorování na mikroskopu

Pozorování připravených vzorků bylo provedeno na digitálním mikroskopu Olympus DSX1000. Digitální mikroskopy využívají digitální kameru pro přenesení pozorovaného obrazu do monitoru počítače. Tato funkce přináší kromě pohodlí při pozorování také mnoho dalších možností využití mikroskopu jako například snadné pořizování, ukládání a případně rovnou úpravu snímků, možnost záznamu videa, automatické scanování povrchu, analýzu 3D vzorků nebo snadné vytváření zpráv.

Příprava vzorků pro pozorování vypadala následovně. Nejprve byl připraven malý obdélníček od každé zkoumané teploty. Obdélníčky byly naskládány do připravené formičky tak, aby byl svrchu pozorovatelný průřez stěnou, a zality pryskyřicí. Následně byly broušeny papírem se zrnitostí P2400 a provedeno první pozorování a nafocení. Před druhým pozorováním byly vzorky broušeny na P4000, leštěny diamantovou suspenzí s částicemi o velikosti 3 mikrony, a nakonec doleštěny suspenzí s částicemi Al_2O_3 o velikosti 0,05 mikronů. Část vyleštěných vzorků je vidět na **obrázku 17**.



Obrázek 17: Vzorky připravené pro mikroskopování.

4 Výsledky

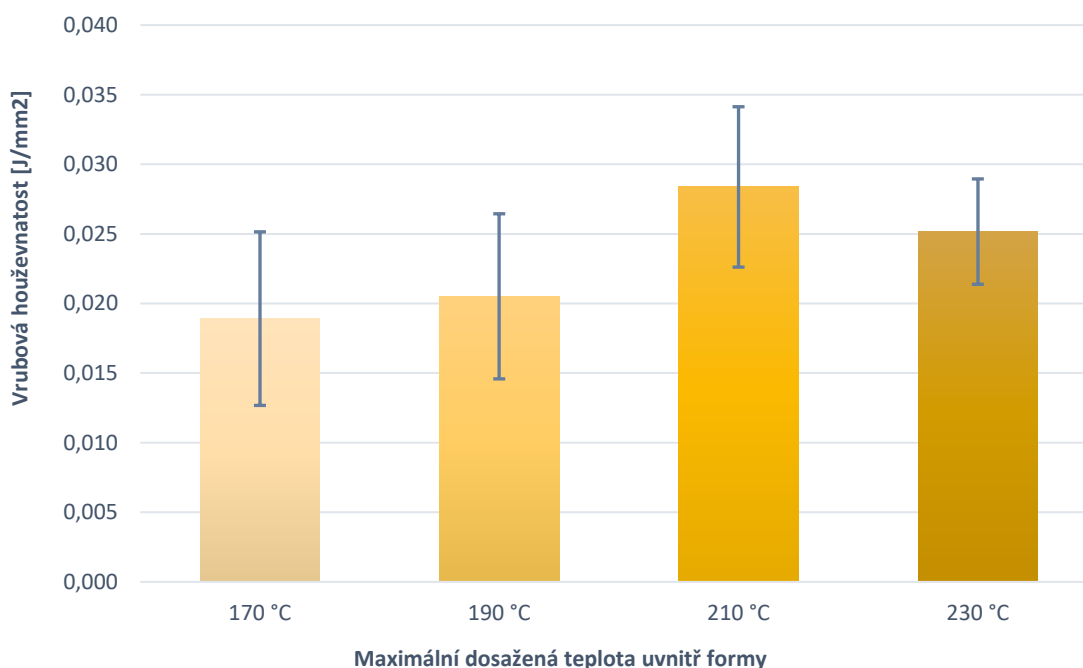
4.1 Vyhodnocení zkoušky rázem v ohybu

Z rázové zkoušky byla vyhodnocována vrubová houževnatost. Zkušební tělíska opatřená vrubem byla jedno po druhém umístěna do zkušebního zařízení, přeražena, a změřená hodnota zaznamenána. Podle vzorce (1) byla naměřená energie, potřebná pro přeražení vzorku, přepočtena na plochu pod vrubem.

Nejprve byly otestovány čtyři vybrané druhy vzorků. Jednalo se o vzorky připravené s maximální dosaženou teplotou ve formě 170, 190, 210 a 230 °C. Pro každou z uvedených teplot bylo provedeno 5 měření. V **tabulce 4** a v grafu (**obr. 18**) jsou vidět zprůměrované vypočtené hodnoty rázové houževnatosti včetně směrodatné odchylky. Hodnoty pro jednotlivá měřená tělíska jsou k nalezení v příloze.

Tab. 4: Přehled výsledků rázové houževnatosti část 1

Max. teplota ve formě	a_{cN} [J/mm²]	SD [J/mm²]	SD [%]
170 °C	0,0189	0,00623	33,0
190 °C	0,0205	0,00593	28,9
210 °C	0,0284	0,00576	20,3
230 °C	0,0252	0,00379	15,0



Obrázek 18: Grafické znázornění naměřených vrubových houževnatostí pro první sérii vzorků včetně vyznačení směrodatné odchylky.

Z naměřených hodnot je možné pozorovat, že nejlepší vrubové houževnatosti dosahuje zkoumaný materiál okolo teploty 210 °C. Při uvažování směrodatných odchylek se však nejedná o zvlášť velký rozdíl hodnot. Odchylna u teploty 170 °C přesahuje 30 % průměru vypočtených hodnot, takže se na tyto výsledky nemůžeme příliš spolehnout. Přijatelnou hodnotu nejistoty má z této série pouze vzorek připravený s maximální teplotou uvnitř formy 230 °C a to 15 % z průměru vypočtených hodnot vrubové houževnatosti.

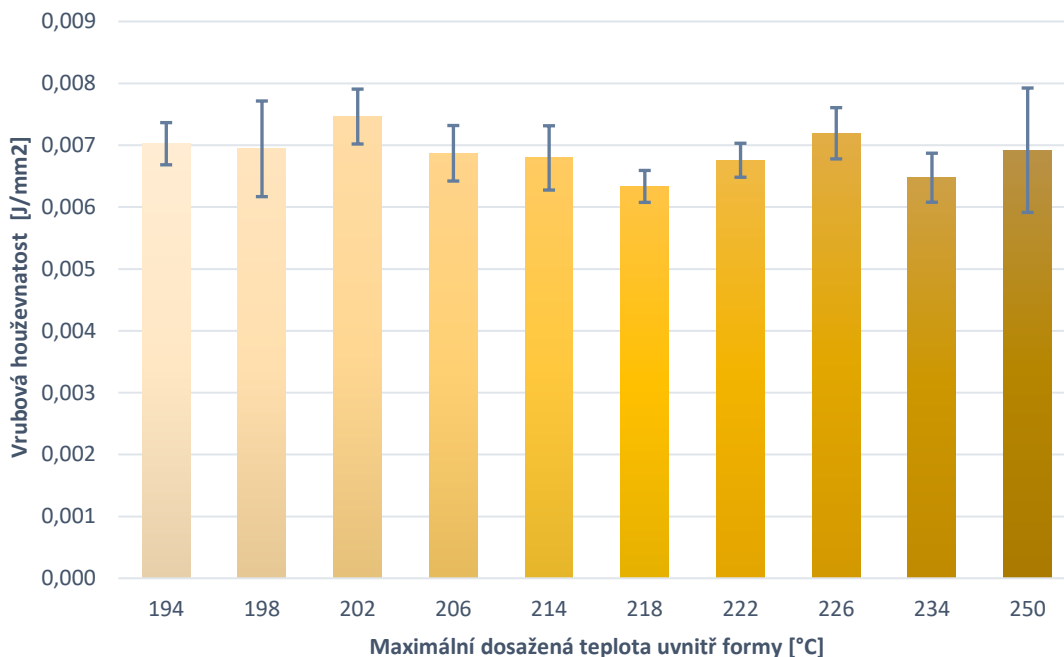
Další vzorky byly zvoleny s rozestupem 4 °C od 190 do 234 °C a jeden záměrně více přepečený na 250 °C. Pro každou z teplot bylo provedeno 6 měření

(kromě teploty 206 °C kde se jedno z tělísek nepodařilo přelomit a bylo znehodnoceno). Cílem bylo zjistit, zda bude naměřená vrubová houževnatost odpovídat křivce stoupající až do teploty kolem 210 °C a následně dojde k poklesu materiálových vlastností vlivem začínající degradace způsobené vysokou teplotou.

Opět byly vzorky rozřezány do tvaru zkušebních tělísek a opatřeny V vrubem tak, aby pod ním zůstala výška 8 mm. Před přeražením na Charpyho kladivě byla pečlivě změřena jejich tloušťka pro přepočítání spotřebované energie na plochu pod vrubem. Výsledky pro první čtyři zkoumané teploty (170, 190, 210 a 230 °C) nemohly být do srovnání zařazeny, jelikož byly testovány za jiných podmínek (teplota tělísek, teplota okolí, vlhkost) a naměřené hodnoty proto vycházejí značně odlišné. Vypočtené zprůměrované hodnoty rázové houževnatosti včetně směrodatných odchylek pro druhou sérii vzorků jsou vidět v **tabulce 5** a v grafu (**obr. 19**).

Tab. 5: Přehled výsledků rázové houževnatosti část 2

Max. teplota ve formě	a_{cN} [J/mm²]	SD [J/mm²]	SD [%]
194 °C	0,0070	0,000341	4,9
198 °C	0,0069	0,000773	11,1
202 °C	0,0075	0,000444	5,9
206 °C	0,0069	0,000449	6,5
214 °C	0,0068	0,000519	7,6
218 °C	0,0063	0,000258	4,1
222 °C	0,0068	0,000275	4,1
226 °C	0,0072	0,000414	5,8
234 °C	0,0065	0,000396	6,1
250 °C	0,0069	0,001005	14,5



Obrázek 19: Grafické znázornění naměřených vrubových houževnatostí pro druhou sérii včetně vyznačení směrodatné odchytky.

Předpoklad, který naznačovaly hodnoty z první série, že by vrubová houževnatost mohla růst spolu s maximální teplotou uvnitř formy až k oblasti kolem 210 °C a poté začít klesat se nepotvrdil. Není zde vidět žádný trend připomínající křivku stoupající do nějaké teploty po níž nastane zlom z důvodu přepečení materiálu a pokles rázové houževnatosti.

Bylo však dosaženo mnohem lepší přesnosti měření než v prvním případě. Až na dvě výjimky je směrodatná odchytka nižší než 8 %. Nejhorší je 14,5 % u výrazně přepečeného vzorku (teplota ve formě 250 °C). Průměrně zde vychází směrodatná odchytky 7,1 % což je více než třikrát lepší přesnost než u první série měření, kde byla průměrná odchytky 24,3 %.

Zjištěná vrubová houževnatost je u všech zkoušených vzorků velmi podobná a nevykazuje výraznou závislost na maximální teplotě dosažené při jejich přípravě. Všechny vypočtené hodnoty se pohybují kolem 0,007 J/mm² (průměrná hodnota je 0,0069). Rozdíl mezi největší a nejmenší naměřenou hodnotou je pouze 0,0011 J/mm², což je 16 % z průměrné hodnoty. Zkoumaný materiál má tedy velmi široké procesní okno, a tudíž vysokou toleranci k nastavení procesních parametrů.

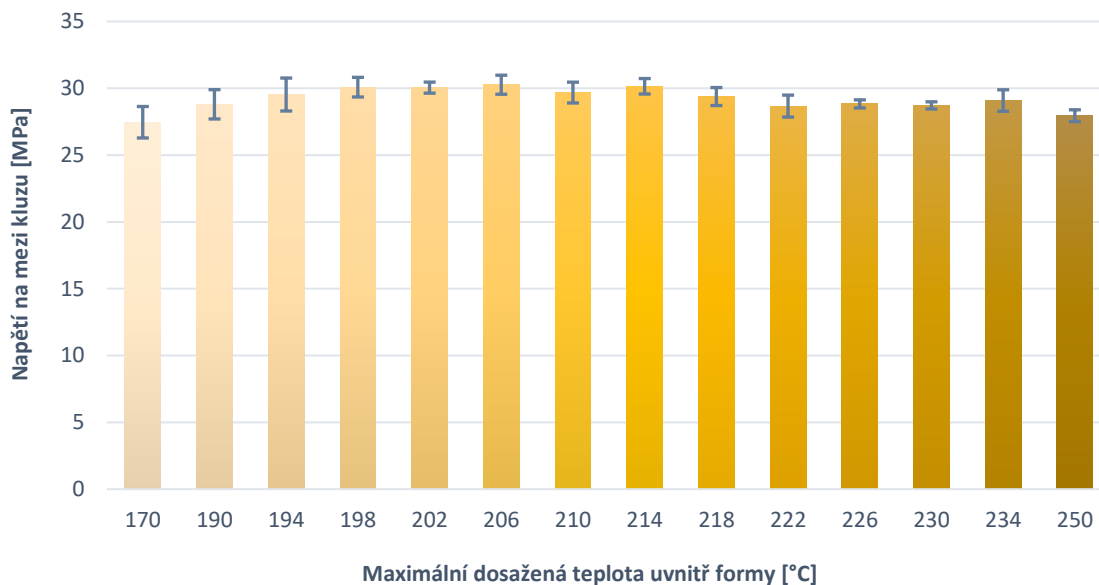
V celém rozmezí zkoumaných teplot 194–250 °C nebylo zaznamenáno výrazné zhoršení vrubové houževnatosti. Zajímavé je, že nedošlo k poklesu ani u teploty 250 °C, kdy byl vzorek již zažloutlý, s lesklým povrchem a charakteristickým zápachem, tudíž zjevně přepečený.

4.2 Vyhodnocení zkoušky tahem

Z tahové zkoušky bylo vyhodnocováno napětí na mezi kluzu σ_y a modul pružnosti E. Pro výpočet σ_y je nutné znát průřez zkoumaného tělíska, a proto bylo třeba každé před vložením do stroje pečlivě proměřit. Po zadání rozměrů tělísek software sám vypočetl mez kluzu a modul pružnosti. Bylo otestováno všech čtrnáct připravených vzorků (maximální teplota uvnitř formy 170–250 °C). Od každé teploty bylo provedeno 5-6 měření. Zprůměrované hodnoty napětí na mezi kluzu včetně směrodatných odchylek jsou uvedeny v **tabulce 6** a v grafu (**obrázek 20**).

Tab. 6: Přehled výsledků zkoušky tahem – napětí na mezi kluzu σ_y

Max. teplota ve formě	σ_y [Mpa]	SD [MPa]	SD [%]
170 °C	27,46	1,178	4,3
190 °C	28,80	1,098	3,8
194 °C	29,53	1,234	4,2
198 °C	30,08	0,736	2,4
202 °C	30,05	0,414	1,4
206 °C	30,27	0,712	2,4
210 °C	29,68	0,779	2,6
214 °C	30,15	0,579	1,9
218 °C	29,38	0,674	2,3
222 °C	28,67	0,824	2,9
226 °C	28,83	0,301	1,0
230 °C	28,72	0,268	0,9
234 °C	29,08	0,806	2,8
250 °C	27,95	0,442	1,6



Obrázek 20: Grafické znázornění naměřených napětí na mezi kluzu včetně vyznačení směrodatné odchylky.

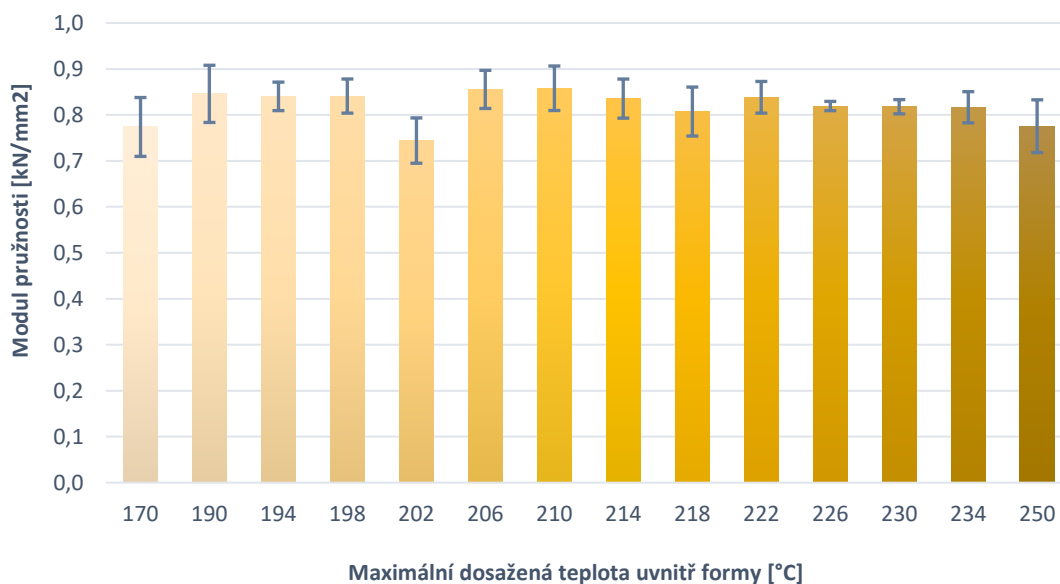
Hodnoty naměřených napětí na mezi kluzu jsou, podobně jako u vrubové houževnatosti, velmi vyrovnané v celém zkoumaném rozmezí teplot přípravy vzorků. Opět zde není vidět žádná známka výraznějšího zhoršení vlastností po dosažení určité maximální teploty. Nejhorší napětí na mezi kluzu mají vzorky na krajích zkoumaného spektra (jeden nedopečený, druhý výrazně přepečený), ale rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší hodnotou je pouze 2,81 MPa, což je necelých 10 % průměrné naměřené hodnoty (29,19 MPa).

Bylo dosaženo velmi dobré přesnosti měření. Nejhorší směrodatná odchylka je 4,3 % a průměrná pouhých 2,5 %, což je téměř třikrát přesnější měření, než jakého bylo dosaženo na Charpyho kladivu.

Hodnoty modulu pružnosti pro jednotlivé zkoumané vzorky jsou uvedeny v **tabulce 7** a v grafu (**obrázek 21**).

Tab. 7: Přehled výsledků zkoušky tahem – modul pružnosti

Max. teplota ve formě	E [kN/mm²]	SD	SD %
170 °C	0,7738	0,064	8,3
190 °C	0,8458	0,062	7,4
194 °C	0,8403	0,031	3,7
198 °C	0,8410	0,037	4,4
202 °C	0,7442	0,049	6,6
206 °C	0,8555	0,041	4,8
210 °C	0,8580	0,048	5,6
214 °C	0,8355	0,043	5,1
218 °C	0,8073	0,053	6,6
222 °C	0,8383	0,034	4,1
226 °C	0,8193	0,010	1,2
230 °C	0,8178	0,016	1,9
234 °C	0,8167	0,034	4,2
250 °C	0,7755	0,057	7,4



Obrázek 21: Grafické znázornění naměřených modulů pružnosti včetně vyznačení směrodatné odchylky.

Naměřené hodnoty modulu pružnosti opět ukazují téměř neměnné vlastnosti v celém zkoumaném intervalu teplot. Vzorky z kraje rozsahu teplot (170 a 250 °C) naznačují jistý pokles, avšak při zohlednění směrodatné odchylky

nemůžeme s jistotou říci, jak bude trend pokračovat. U teploty 202 °C je vidět náhlý pokles oproti sousedním vzorkům. Ten mohl být způsoben například nepřesným uložením zkoušených tělísek do stroje a jejich nedostatečným upevnění, v důsledku čehož by došlo k proklouznutí vzorku. Naměřené prodloužení by v tom případě bylo větší a vypočtený modul tím pádem menší. Případně se může jednat o statistickou chybu v rámci směrodatné odchylky (po teplotách z krajů intervalu má toto měření nejvyšší procentuální směrodatnou odchylku).

Celková přesnost měření vychází opět velmi dobře. Průměrná směrodatná odchylka je 5,1 %. Největší nejistota měření je opět u teplot 170 a 250 °C a to 8,3 a 7,4 %.

4.3 Vyhodnocení pozorování na mikroskopu

Všech čtrnáct připravených vzorků bylo zalito do pryskyřice a zbrušeno zrnitostí P2400. Poté bylo provedeno první pozorování. Na každém vzorku bylo vybráno reprezentativní místo, a to nascanováno v celém průřezu, od jednoho povrchu k druhému. Byla vybírána místa obsahující co nejvíce kavit a nehomogenit v materiálu za účelem zjištění jejich potenciální souvislosti s mírou přepečení či nedopečení materiálu a s tím související změnou materiálových vlastností. U první série fotek byly však kavity pozorovatelné pouze u vzorků připravovaných na maximální teplotu ve formě 170 a 190 °C. První tři teploty (170, 190 a 194 °C) byly nafoceny znovu, tentokrát v celé délce. Povrch byl zbarven černým permanentním fixem a přetřen lihovým hadříkem s cílem zvýraznit kavity pro snadnější pozorování. Tyto mikroskopové snímky jsou vidět na **obrázku 22**.

170 °C



190 °C

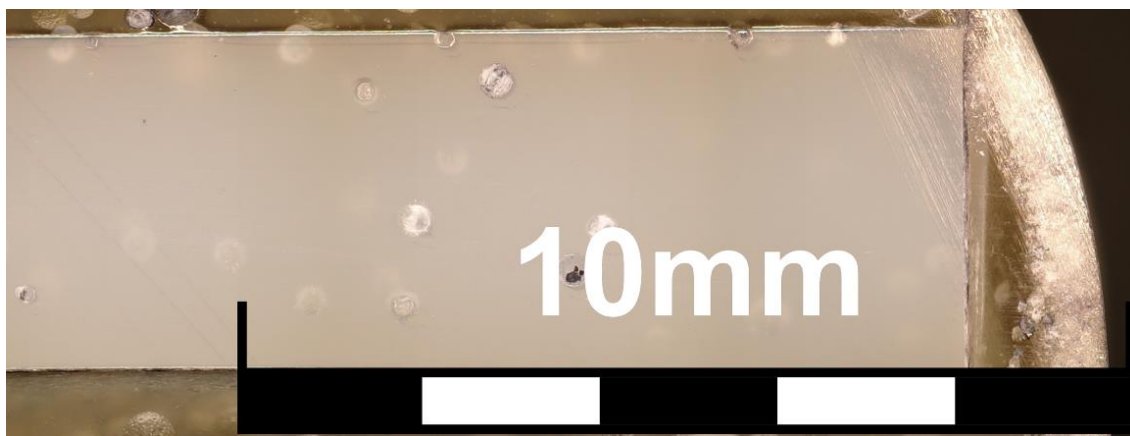


194 °C



Obrázek 22: Pozorované bublinky ve stěně vzorku, zvýrazněné černým fixem.

Na vzorcích bylo vidět výrazné poškrábání od broušení, proto byly přebroušeny zrnitostí P4000 a vyleštěny suspenzí s částicemi o velikosti 3 a nakonec 0,05 mikronů. Všechny vzorky byly opět nafoceny. Polyethylen je velmi náchylný na poškrábání proto i po takto jemném leštění byly na povrchu patrné vrypy. Dodatečné leštění bohužel neodhalilo bublinky u žádných dalších zkoumaných vzorků. Pouze u vzorku připravovaného na teplotu 170 °C, který obsahoval zdaleka největší množství bublinek v materiálu, bylo po vyleštění možno pozorovat také množství bublinek pod povrchem (**obrázek 23**).



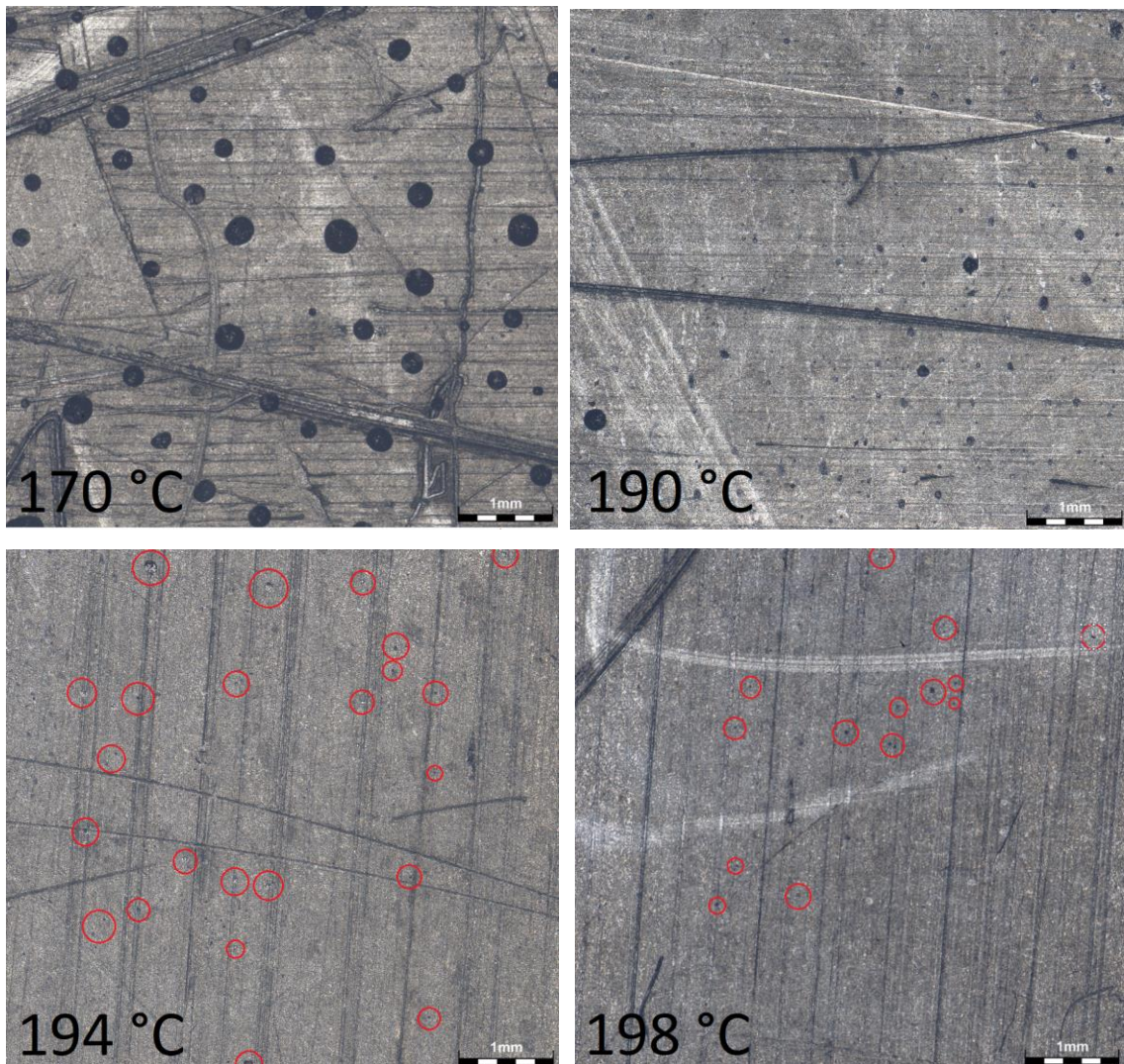
Obrázek 23: Bublinky pod povrchem po leštění u vzorku připraveného na maximální teplotu uvnitř formy 170 °C.

U teploty 250 °C je na vnějším povrchu vzorku pozorovatelné zažloutnutí v důsledku přepečení (**obrázek 24**).



Obrázek 24: Nahoře – zažloutnutí vnější strany vzorku (levá strana) připraveného na teplotu 250 °C, dole vzorek připravený na teplotu 230 °C pro porovnání.

Poslední pozorování bylo zaměřeno na vnější a vnitřní plochu připravených vzorků. Vzorky byly již značně poškrábané z předchozí manipulace, ale i přesto bylo možné velmi snadno pozorovat povrchové bublinky (tzv pin holes) na vnější straně. Opět bylo možné pozorovat bublinky pouze na prvních několika vzorcích. U vzorků připravených na maximální teplotu ve formě 202 °C a vyšší už žádné kavity na povrchu pozorovatelné nebyly. Fotky pozorovaných povrchových bublinek jsou na **obrázku 25**.



Obrázek 25: Povrchové bublinky „pin holes“

Z obrázku výše je názorně vidět, že s rostoucí dosaženou teplotou při přípravě vzorků rapidně klesá poloměr pozorovaných bublinek a také četnost jejich výskytu.

5 Závěr

Cílem práce bylo otestovat vybraný materiál od firmy Novachemicals, používaný ve firmě Železný s.r.o., a zjistit závislost mechanických vlastností výrobku na způsobu přípravy. Konkrétně na maximální dosažené teplotě uvnitř formy při procesu pečení. V rámci praktické části této práce bylo připraveno čtrnáct zkušebních výrobků tvaru kvádrů, každý s jinou maximální dosaženou teplotou uvnitř formy. Ostatní výrobní parametry byly ponechány stejné. Z těchto kvádrů byla nařezána, potažmo vysekána, zkušební tělíska, jejichž mechanické vlastnosti a struktura byly následně otestovány v laboratoři.

První zkouškou mechanických vlastností byla zkouška rázem v ohybu metodou Charpy. Díky této zkoušce byly získány hodnoty vrubové houževnatosti. První měření naznačovalo předpoklad, že do určité teploty přípravy vzorku budou jeho mechanické vlastnosti stoupat, načež dojde k jejich strmému poklesu. Data získaná proměřením zbytku vzorků však tento předpoklad vyvrátila. Žádná z teplot se nejeví jako kritická, po jejíž překročení by materiál začal výrazně ztrácet své vlastnosti. Naopak všechny naměřené hodnoty rázové houževnatosti jsou velmi vyrovnané v celém zkoumaném rozsahu teplot.

Druhé měření proběhlo na univerzálním trhacím stroji, kde bylo měřeno napětí na mezi kluzu a modul pružnosti. Získané hodnoty obou měřených veličin korespondují s výsledky měření vrubové houževnatosti. Ani zde není patrné výraznější zhoršení vlastností materiálu po dosažení určité maximální teploty přípravy.

Analýza struktury připravených vzorků byla provedena pomocí digitálního mikroskopu. Byl zkoumán jak průřez stěnou vzorku, tak jeho vnitřní a vnější povrch. Výskyt bublinek v materiálu bývá považován za znak nedostatečného dopečení výrobku. Tyto bublinky byly pozorovány pouze u prvních dvou teplot (170 a 190 °C). Výraznější známky přepečení materiálu byly pozorovatelné až při teplotě 250 °C (zažloutnutí, lesklý povrch a charakteristický zápach).

Testované zkoušky se přímo pro použití v provozu nehodí. Rázová zkouška za pokojové teploty nedosahuje uspokojivé přesnosti měření a vyžaduje poměrně

časově náročnou přípravu testovaných vzorků. Vzorky pro zkoušku tahem jsou sice snadněji připravitelné, zkouška však vyžaduje použití finančně nákladnějšího zkušebního zařízení. Vizuální zkouška pomocí mikroskopu nenabízí žádné spolehlivé indikátory správného stupně dotavení. Výrobce ve svém materiálovém listu uvádí rázovou zkoušku za $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ta by sice v praxi vyžadovala výrazně dražší vybavení, teoreticky by však mohla poskytnout lepší výsledky než rázová zkouška za pokojové teploty.

Hlavním a poněkud nečekaným přínosem této práce bylo zjištění, že zkoumaný materiál má velké procesní okno, a tedy i velmi vysokou toleranci nastavení procesních parametrů. Obzvláště v porovnání s dříve vyráběnou verzí materiálu SURPASS s označením RMs244-U(UG). Hledání provozní zkoušky pro průběžnou kontrolu správnosti nastavení procesních parametrů tak do jisté míry ztrácí na významu.

Zjištění vyplývající z této práce, byla použita pro optimalizaci výrobního procesu v praxi. Nový materiál má oproti dříve používanému nižší teplotu tavení. Díky tomu mohl být zkrácen výrobní proces zhruba o 20 %, což znatelně zefektivní výrobu a sníží její energetickou náročnost. Široké procesní okno snižuje riziko přepečení či nedopečení výrobku a není tedy nutná tak důkladná kontrola správného nastavení procesních parametrů.

Pro zlepšení kontroly správného průběhu výrobního procesu by bylo vhodné vybavit výrobní zařízení čidly pro měření teploty vzduchu uvnitř formy v průběhu pečení. Z principu technologie (rotace a kývání formy, vysoká teplota) a časté výměny forem může být implementace takového monitorovacího systému technicky náročnější, avšak získaná data by velmi přispěla ke kontrole a optimalizaci výrobního procesu.

6 Zdroje

- [1] Cantor, K. M., & Watts, P. (2011). *Plastics Processing. Applied Plastics Engineering Handbook, 195–203*. doi:10.1016/b978-1-4377-3514-7.10012-1
- [2] Nugent Paul. *Applied Plastics Engineering Handbook (Second Edition)*. United states William Andrew Publishing, 2017. Pages 321-343. ISBN 9780323390408
- [3] Crawford, R. J. (1996). *Recent advances in the manufacture of plastic products by rotomoulding. Journal of Materials Processing Technology, 56(1-4), 263–271*. doi:10.1016/0924-0136(95)01840-9
- [4] Ogila, Kennedy & Shao, M. & Yang, W. & Tan, J.. (2017). Rotational molding: A review of the models and materials. *Express Polymer Letters*. 11. 778-798. 10.3144/expresspolymlett.2017.75.
- [5] Crawford, R. J., & Throne, J. L. (2002). INTRODUCTION TO ROTATIONAL MOLDING. *Rotational Molding Technology, 1–18*. doi:10.1016/b978-188420785-3.50003-4
- [6] Crawford, R. J., & Throne, J. L. (2002). ROTATIONAL MOLDING MACHINES. *Rotational Molding Technology, 111–148*. doi:10.1016/b978-188420785-3.50006-x
- [7] Rock N Roll Rotational Moulding Machines [online]. [cit. 9.3.2021]. Dostupné z: <http://www.rotationalmouldingmachinery.com/roto-high-performance-rock-n-roll-machine.html>
- [8] The Importance Of Rotomolding Machines - TYROTO [online]. [cit. 09.03.2021]. Dostupné z: <http://www.tyROTO.com/rotomolding-machine/the-importance-of-rotomolding-machines.html>
- [9] ROTATIONAL MOULDING – TECHNICAL GUIDE. Quenos [online]. [cit. 09.03.2021]. Dostupné z: [http://www.qenos.com/internet/home.nsf/\(LUIImages\)/TG6Roto/\\$File/TG6Roto.pdf](http://www.qenos.com/internet/home.nsf/(LUIImages)/TG6Roto/$File/TG6Roto.pdf)
- [10] Shuttle rotomolding machine. Zheijang Anji Tianyang Rotational Moulding Machinery Co. [online]. [cit. 10.03.2021]. Dostupné z: <http://www.zjajty.com/109974-5685/226111.html>

- [11] Multi Arm Bi Axial Rotomoulding Machine / Shuttle Rotational Molding Machine. [online]. [cit. 10.03.2021]. Dostupné z: <http://www.rotomolding-machine.com/sale-12409649-multi-arm-bi-axial-rotomoulding-machine-shuttle-rotational-molding-machine.html>
- [12] Melt Flow Index - an overview | ScienceDirect Topics. [online]. [cit. 10.03.2021]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/melt-flow-index>
- [13] Hmotnostní (MFR) a objemový (MVR) index toku taveniny | JD Dvořák, s.r.o. - Zkušební technika [online]. [cit. 10.03.2021]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/stanoveni-hmotnostniho-mfr-objemoveho-mvr-indexu-toku-taveniny>
- [14] Polyethylene - New World Encyclopedia. [online]. [cit. 12.03.2021]. Dostupné z: <https://www.newworldencyclopedia.org/entry/polyethylene>
- [15] Crawford, R. J., & Throne, J. L. (2002). ROTATIONAL MOLDING POLYMERS. *Rotational Molding Technology*, 19–68. doi:10.1016/b978-188420785-3.50004-6
- [16] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [17] Spence, A. G., & Crawford, R. J. (1996). Removal of Pinholes and Bubbles from Rotationally Moulded Products. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 210(6), 521–533. doi:10.1243/pime_proc_1996_210_151_02
- [18] Pick, L. T., & Harkin-Jones, E. (2006). Effect of mould pressurisation on impact strength of rotationally moulded polyethylenes. *Plastics, Rubber and Composites*, 35(8), 324–330. doi:10.1179/174328906x143868
- [19] Kontopoulou, M. & Vlachopoulos, John. (1999). Bubble dissolution in molten polymers and its role in rotational molding. *Polymer Engineering & Science*. 39. 1189 - 1198. 10.1002/pen.11505.
- [20] ČSN EN ISO 179–1: Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

[21] ELUC. ELUC [online] [cit. 03.07.2021]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1567>

[22] Jancar, Josef & Nezbedova, E. (2021). Zkoušení plastů. Fakulta chemická [online]. [cit. 03.07.2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/40381569_Zkouseni_plastu

[22] ČSN EN ISO 527-1: Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Základní principy. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[23] ČSN EN ISO 527-1: Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

[24] Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání. [online] [cit. 03.07.2021]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>

7 Přílohy

Všechny mikroskopové snímky jsou přiloženy na DVD v plné kvalitě.

Příloha 1: Naměřené hodnoty z tahové zkoušky

Teplota [°C]	Vrcholové			Mez kluzu (MPa)	Modul (kN/mm ²)	Směrodatná		Směrodatná			
	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	zatižení (kN)			Průměrná mez kluzu	odchylka	SD %	Průměrný modul	odchylka	SD %
170	10,34	3,83	1,028	25,9	0,67	27,46	1,178134	4,290365	0,7738	0,064002	8,271073
170-2	10,15	3,51	0,986	27,7	0,778						
170-3	10,2	3,49	0,987	27,7	0,786						
170-4	10,16	3,55	0,97	26,9	0,846						
170-5	10,35	3,57	1,074	29,1	0,789						
190	10,46	3,55	1,047	28,2	0,775	28,8	1,097725	3,811545	0,8458	0,062187	7,352426
190-2	10,28	3,39	0,964	27,7	0,811						
190-3	10,13	3,33	0,972	28,8	0,843						
190-4	10,2	3,45	1,01	28,7	0,859						
190-5	10,22	3,52	1,1	30,6	0,941						
194	10,24	3,49	1,063	29,7	0,857	29,53333	1,233964	4,178207	0,840333	0,031008	3,689908
194-2	10,9	3,45	1,022	27,2	0,783						
194-3	10,18	3,35	1,013	29,7	0,844						
194-4	10,3	3,54	1,083	29,7	0,845						
194-5	10,3	3,59	1,141	30,9	0,875						
194-6	10,39	3,52	1,098	30	0,838						
198	10,26	3,42	1,025	29,2	0,823	30,08333	0,73598	2,446471	0,841	0,037148	4,417164
198-2	10,45	3,55	1,118	30,1	0,85						
198-3	10,32	3,45	1,109	31,1	0,888						
198-4	10,21	3,42	1,054	30,2	0,832						
198-5	10,25	3,59	1,125	30,6	0,783						
198-6	10,18	3,67	1,096	29,3	0,87						
202	10,43	3,37	1,052	29,9	0,723	30,05	0,413521	1,376111	0,744167	0,049297	6,624419
202-2	10,32	3,5	1,109	30,7	0,693						
202-3	10,29	3,54	1,101	30,2	0,838						
202-4	10,27	3,37	1,047	30,2	0,728						
202-5	10,37	3,42	1,057	29,8	0,743						
202-6	10,38	3,54	1,085	29,5	0,74						
206	10,2	3,57	1,135	31,2	0,874	30,26667	0,711805	2,351779	0,8555	0,041462	4,846526
206-2	10,34	3,67	1,155	30,4	0,774						
206-3	10,3	3,46	1,062	29,8	0,884						
206-4	10,22	3,55	1,126	31	0,883						
206-5	10,21	3,47	1,05	29,6	0,862						
206-6	10,36	3,6	1,104	29,6	0,856						

Teplota [°C]	Vrcholové				Směrodat				Směrodat					
	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Zatížení (kN)	Mez kluzu (MPa)	Modul (kN/mm ²)	Průměrná mez kluzu	Průměrná odchylka	SD %	Průměrný modul	Průměrná odchylka	SD %	Průměrný modul	Průměrná odchylka	SD %
210	10,27	3,4	1,071	30,7	0,774	29,68	0,779102	2,625007	0,858	0,04842	5,643361			
210-2	10,17	3,43	1,053	30,2	0,896									
210-3	10,4	3,54	1,056	28,7	0,867									
210-4	10,18	3,33	0,996	29,4	0,884									
210-5	10,19	3,38	1,014	29,4	0,869									
214	10,24	3,56	1,125	30,9	0,861	30,15	0,578792	1,919708	0,8355	0,042534	5,090786			
214-2	10,36	3,43	1,063	29,9	0,862									
214-3	10,16	3,45	1,078	30,8	0,847									
214-4	10,39	3,41	1,044	29,5	0,751									
214-5	10,2	3,44	1,041	29,7	0,836									
214-6	10,4	3,49	1,092	30,1	0,856									
218	10,19	3,68	1,138	30,4	0,833	29,38333	0,673548	2,292278	0,807333	0,053272	6,598468			
218-2	10,2	3,5	1,044	29,3	0,83									
218-3	10,15	3,55	1,053	29,2	0,813									
218-4	10,3	3,59	1,071	29	0,72									
218-5	10,41	3,65	1,083	28,5	0,775									
218-6	10,23	3,47	1,061	29,9	0,873									
222	10,35	3,51	1,026	28,2	0,865	28,66667	0,823812	2,873764	0,838333	0,034483	4,113262			
222-2	10,44	3,55	1,092	29,5	0,857									
222-3	10,5	3,49	1,07	29,2	0,852									
222-4	10,36	3,57	1,09	29,5	0,862									
222-5	10,55	3,65	1,07	27,8	0,778									
222-6	10,65	3,6	1,065	27,8	0,816									
226	10,53	3,72	1,135	29	0,805	28,83333	0,301109	1,044309	0,819333	0,010073	1,229422			
226-2	10,4	3,68	1,093	28,6	0,831									
226-3	10,39	3,59	1,085	29,1	0,817									
226-4	10,39	3,52	1,045	28,6	0,811									
226-5	10,52	3,6	1,107	29,2	0,825									
226-6	10,42	3,49	1,036	28,5	0,827									
230	10,5	3,58	1,094	29,1	0,814	28,72	0,268328	0,93429	0,8178	0,015515	1,897103			
230-2	10,4	3,48	1,035	28,6	0,827									
230-3	10,42	3,45	1,025	28,5	0,797									
230-4	10,4	3,47	1,042	28,9	0,838									
230-5	10,46	3,54	1,056	28,5	0,813									

Teplota [°C]	Vrcholové						Směrodat		Průměrný		Směrodat	
	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	zatižení (kN)	Mez kluzu (MPa)	Modul (kN/mm ²)	Průměrná mez kluzu	ná odchylka	SD %	modul	ná odchylka	SD %	
234	234-1	10,55	3,67	1,082	27,9	0,77	29,08333	0,806019	2,771412	0,816667	0,033927	4,154372
	234-2	10,54	3,69	1,099	28,3	0,8						
	234-3	10,24	3,5	1,066	29,7	0,819						
	234-4	10,4	3,52	1,095	29,9	0,855						
	234-5	10,4	3,48	1,067	29,5	0,8						
	234-6	10,42	3,61	1,097	29,2	0,856						
250	250-1	10,44	3,5	1,03	28,2	0,795	27,95	0,441588	1,579921	0,7755	0,05741	7,402957
	250-2	10,5	3,49	1,011	27,6	0,778						
	250-3	10,48	3,58	1,048	27,9	0,765						
	250-4	10,38	3,52	1,032	28,2	0,831						
	250-5	10,62	3,69	1,069	27,3	0,669						
	250-6	10,37	3,45	1,018	28,5	0,815						

Příloha 2: Naměřené hodnoty z rázové zkoušky

Teplota [°C]	výška [mm]	tloušťka [mm]	plocha S [mm ²]	energie E [J]	E/S [J/mm ²]	průměrná vrub. houževnatost		
						SD	SD %	
170	1	8	3,45	27,6	0,7	0,0254		
	2	8	3,45	27,6	0,4	0,0145		
	3	8	3,45	27,6	0,72	0,0261		
	4	8	3,8	30,4	0,42	0,0138		
	5	8	3,8	30,4	0,45	0,0148	0,0189	0,006234473
190	1	8	3,45	27,6	0,73	0,0264		
	2	8	3,4	27,2	0,45	0,0165		
	3	8	3,45	27,6	0,76	0,0275		
	4	8	3,35	26,8	0,43	0,0160		
	5	8	3,75	30	0,48	0,0160	0,0205	0,005929784
210	1	8	3,5	28	0,93	0,0332		
	2	8	3,6	28,8	0,81	0,0281		
	3	8	3,7	29,6	0,57	0,0193		
	4	8	3,55	28,4	0,79	0,0278		
	5	8	3,4	27,2	0,91	0,0335	0,0284	0,005760868
230	1	8	3,45	27,6	0,73	0,0264		
	2	8	3,5	28	0,73	0,0261		
	3	8	3,5	28	0,7	0,0250		
	4	8	3,5	28	0,82	0,0293		
	5	8	3,55	28,4	0,54	0,0190	0,0252	0,003785243

Teplota [°C]	výška [mm]	tloušťka [mm]	plocha S [mm ²]	energie E [kp.m]	energie E [J]	E/S [J/mm ²]	průměrná vrub. houževnatost	SD	SD [%]
194	1	8	3,62	28,96	0,021	0,20601	0,0071	0,000340991	4,854332869
	2	8	3,8	30,4	0,0225	0,220725	0,0073		
	3	8	3,45	27,6	0,0191	0,187371	0,0068		
	4	8	3,5	28	0,0196	0,192276	0,0069		
	5	8	3,52	28,16	0,0216	0,211896	0,0075		
	6	8	3,46	27,68	0,0186	0,182466	0,0066		
198	1	8	3,49	27,92	0,0186	0,182466	0,0065	0,000772965	11,13511096
	2	8	3,71	29,68	0,0205	0,201105	0,0068		
	3	8	3,6	28,8	0,0171	0,167751	0,0058		
	4	8	3,4	27,2	0,0196	0,192276	0,0071		
	5	8	3,52	28,16	0,0233	0,228573	0,0081		
	6	8	3,38	27,04	0,0202	0,198162	0,0073		
202	1	8	3,6	28,8	0,0212	0,207972	0,0072	0,000443611	5,94407297
	2	8	3,81	30,48	0,0225	0,220725	0,0072		
	3	8	3,75	30	0,0245	0,240345	0,0080		
	4	8	3,6	28,8	0,0231	0,226611	0,0079		
	5	8	4	32	0,0223	0,218763	0,0068		
	6	8	3,55	28,4	0,022	0,21582	0,0076		
206	1	8	3,5	28	0,0182	0,178542	0,0064	0,000448765	6,532601238
	2	8	3,65	29,2	0,021	0,20601	0,0071		
	3	8	3,57	28,56	0,0189	0,185409	0,0065		
	4	8	3,8	30,4	0,0215	0,210915	0,0069		
	5	8	3,8	30,4	0,0232	0,227592	0,0075		
214	1	8	3,33	26,64	0,0172	0,168732	0,0063	0,000519467	7,645129267
	2	8	3,5	28	0,0191	0,187371	0,0067		
	3	8	3,51	28,08	0,0175	0,171675	0,0061		
	4	8	3,25	26	0,0199	0,195219	0,0075		
	5	8	3,6	28,8	0,0205	0,201105	0,0070		
	6	8	3,35	26,8	0,0195	0,191295	0,0071		

Teplota [°C]	výška [mm]	tloušťka [mm]	plocha S [mm ²]	energie E [kp.m]	energie E [J]	E/S [J/mm ²]	průměrná vrub. houževnatost	SD	SD [%]
218	1	8	29,12	0,0193	0,189333	0,0065	0,0063	0,000257932	4,072124055
	2	8	30,24	0,0189	0,185409	0,0061			
	3	8	29,28	0,0202	0,198162	0,0068			
	4	8	28,8	0,0179	0,175599	0,0061			
	5	8	29,28	0,0185	0,181485	0,0062			
	6	8	30,48	0,0196	0,192276	0,0063			
222	1	8	29,44	0,0212	0,207972	0,0071	0,0068	0,000274627	4,06439863
	2	8	29,92	0,0198	0,194238	0,0065			
	3	8	30,24	0,0196	0,192276	0,0064			
	4	8	30,72	0,0218	0,213858	0,0070			
	5	8	31,92	0,0222	0,217782	0,0068			
	6	8	28,96	0,0202	0,198162	0,0068			
226	1	8	28,08	0,0222	0,217782	0,0078	0,0072	0,000414256	5,759268524
	2	8	30,48	0,0206	0,202086	0,0066			
	3	8	28,88	0,021	0,20601	0,0071			
	4	8	28,8	0,0204	0,200124	0,0069			
	5	8	30,24	0,0219	0,214839	0,0071			
	6	8	29,36	0,0227	0,222687	0,0076			
234	1	8	27,92	0,019	0,18639	0,0067	0,0065	0,000396214	6,119648978
	2	8	29,44	0,0188	0,184428	0,0063			
	3	8	27,52	0,0184	0,180504	0,0066			
	4	8	28,32	0,0194	0,190314	0,0067			
	5	8	28,88	0,017	0,16677	0,0058			
	6	8	27,2	0,019	0,18639	0,0069			
250	1	8	26,4	0,024	0,23544	0,0089	0,0069	0,001005427	14,53077833
	2	8	27,2	0,0175	0,171675	0,0063			
	3	8	28,56	0,0202	0,198162	0,0069			
	4	8	28,64	0,0187	0,183447	0,0064			
	5	8	28,48	0,0191	0,187371	0,0066			
	6	8	29,6	0,0192	0,188352	0,0064			



NSF

SURPASS® RMs245-U(UG) Resin

Octene Copolymer sHDPE Rotational Molding Resin

product data sheet

Property	ASTM ⁽¹⁾	Typical Values ⁽²⁾	
Melt Index ⁽³⁾	D 1238	1.7 g/10 min	
Density	D 792	0.945 g/cm ³	
		METRIC UNITS	ENGLISH UNITS
Melting Point (DSC)		127 °C	261 °F
Flexural Modulus	⁽⁴⁾ D 790	1,030 MPa	149,400 psi
Yield Strength	⁽⁵⁾ D 638	23 MPa	3,300 psi
Elongation at Yield	⁽⁵⁾ D 638	11 %	11 %
ESCR, (F ₅₀)	⁽⁶⁾ D 1693	> 1 000 h	
Heat Distortion Temperature			
- 66 psi (4.64 kg/cm ²)	D 648	63 °C	145 °F
- 264 psi (18.56 kg/cm ²)	D 648	43 °C	109 °F
ARM Low Temperature Impact	⁽⁷⁾		
- 0.125" (3.17 mm)	ARM Method	75 J	55 ft-lb
- 0.250" (6.35 mm)	ARM Method	> 245 J	> 180 ft-lb

(1) Properties designated have been determined using methods which are in accordance with, or substantially in accordance with, the specified testing standards.

(2) Typical Values represent average laboratory values and are intended as guides only, not as specifications.

(3) Condition 190°C/2.16 kg.

(4) 1% Strain Value. From compression molded samples.

(5) Type IV specimen, 2" (50.8 mm) per minute test speed, 0.075" (1.9 mm) thickness compression molded samples.

(6) Condition A & B, 100% IGEPAL, 50°C, F50 values. From compression molded specimens.

(7) -40°C on rotomolded samples.

Melt Index 1.7

Density 0.945

Features

- Exceptional low temperature impact properties
- Broad processing window
- High stiffness for very large tanks, combined with exceptional ESCR performance
- Superior whiteness for improved part appearance, resistant to gas fading
- NSF listed for Standards #24, 51, 61
- Broad application use and potential for resin consolidation
- Good interior finish on large tanks
- UL 94 HB
- HDB rating 1600 psi

Additives

- Processing antioxidants
- UV stabilizers (estimated UV resistance >UV20)

Applications

- Septic tanks
- Very large tanks (up to 20,000 gallons)
- Agricultural tanks as small as 3,000 gallons



SURPASS™ polyethylene

Product Data Sheet

Octene sHDPE Rotational Molding Resin

RM_s244-U/UG

Melt Index 1.7

Density 0.944

Features

- Octene copolymer
- Exceptional low temperature impact properties
- Outstanding stiffness
- Broad processing window
- Superior whiteness for improved part appearance
- Easy mold release
- NSF pending for Standards 14, 24 and 61

Additives

- Processing antioxidants
- UV stabilizers (resin is designed for 8000 h of weatherometer exposure)

Applications

- Custom industrial parts
- Storage tanks
- Marine products
- Material handling containers

Properties	ASTM (1)	Typical Values (2)	
		Compression Molded	Rotational Molded
Melt Index ⁽³⁾	D 1238	1.7 g/10 min	—
Density	D 792	0.944 g/cm ³	—
CTL ESCR ⁽⁴⁾	ARM Method	200 hrs	—
Flexural Modulus ⁽⁵⁾	D 790	980 MPa (142 000 psi)	950 MPa (137 790 psi)
Tensile Yield Strength ⁽⁶⁾	D 638	23.4 MPa (3 400 psi)	23.5 MPa (3 410 psi)
Melting Point	E 794	129.4 °C (265 °F)	—
Heat Distortion Temperature 66 psi (4.64 kg/cm ²) 264 psi (18.56 kg/cm ²)	D 648	66°C (151 °F)	—
	D 648	44°C (111 °F)	—
ARM Low Temperature Impact ⁽⁷⁾ 0.250" (6.35 mm)	ARM Method	—	217 J (160 ft-lb)

(1) Properties designated have been determined in accordance with the current issues of the specified testing methods. Methods of the American Society for Testing and Materials (ASTM) are used wherever applicable.

(2) Typical Values represent average laboratory values and are intended as guides only, not as specifications.

(3) Condition 190/2.16.

(4) 10% Igepal. ARM method, 4.5 MPa tensile stress.

(5) 1% Strain Value.

(6) Type IV specimen, 2" (50.8 mm) per minute test speed, 0.075" (1.9 mm) thickness.

(7) -40°C.