



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**VLIV STÁRNUTÍ NA VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH
MATERIÁLŮ**
INFLUENCE OF AGING ON SANDWICH MATERIALS PROPERTIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Aleš Smékal

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Josef Klement, CSc.

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Aleš Smékal**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Stavba letadel
Vedoucí práce: **doc. Ing. Josef Klement, CSc.**
Akademický rok: 2016/17

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

Vliv stárnutí na vlastnosti sendvičových materiálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Sendvičové materiály jsou v leteckých konstrukcích velmi časté. Skládají se z pevných potahů a vloženého lehkého jádra. Tyto prvky jsou vzájemně spojené lepením. Vlivem působení pracovního prostředí dochází k degradaci některých vlastností. K tomuto stárnutí dochází jak vlivem dlouhodobého působení normální atmosféry tak i působením agresivnějšího prostředí, např. provozními kapalinami. Obsahem řešeného problému bude stanovení těchto základních vlivů na statické mechanické vlastnosti sendvičů s voštinovým jádrem.

Cíle diplomové práce:

Experimentální určení degradace mechanických vlastností sendvičových materiálů s kovými potahy a voštinovým jádrem po dlouhodobém působení vzdušné atmosféry a po zrychleném stárnutí vlivem vlhkého tepla.

Seznam literatury:

LEE, Lieng-Huang: Adhesive Bonding. New York: Plenum Press, 1991.

PETERKA, J.: Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. Praha: SNTL, 1980. ISBN 04-216-80.

ASTM C 393-00. Standard test method for flexural properties of sandwich construction. ASTM International, 2000.

ASTM C 365-03. Standard test method for flatwise compressive properties of sandwich cores. ASTM International, 2003.

HENDL, J.: Přehled statistických metod zpracování dat. Praha: Portál, 2004. ISBN 80-7178-820-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 8. 11. 2016



doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

První část práce se zabývá obecným popisem sendvičových materiálů. Počínaje skládáním jednotlivých částí sendvičového panelu, způsobu přenosu zatížení, možného vlivu prostředí na lepidlo a zkoušení hotového sendvičového panelu.

Druhá část práce je i jejím cílem, experimentálně stanovit degradaci mechanických vlastností sendvičových panelů s kovovými potahy a jádrem po 15 -ti letech stárnutí ve vzdušné atmosféře a po zrychleném stárnutí působením vlhkého tepla a solného prostředí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Sendvičový panel, potah, jádro sendviče, stárnutí, degradace vlastností, zrychlené stárnutí

ABSTRACT

The first part of the master's thesis deals with sandwich materials. Starting with composition of parts which the sandwich panel is made of. The thesis continues with loading distribution and testing of entire sandwich panel. The impact of environment is considered as well.

The second part is its goal – determine degradation of the properties of sandwich panels with metal sheets and core after 15 years aging in the common atmosphere and aging in moist-heat and salt environment by experiment.

KEYWORDS

Sandwich panel, sheet, sandwich core, aging, properties degradation, accelerated aging

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Smékal, A. *Vliv stárnutí na vlastnosti sendvičových materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 70 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Josef Klement, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Josefa Klementa, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20. května 2017

.....

Bc. Aleš Smékal

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu doc. Ing. Josefu Klementovi, CSc. za obětavou pomoc, cenné rady a připomínky při tvorbě diplomové práce. Taktéž děkuji Ing. Janu Šplíchalovi Ph.D. za pomoc a ochotu při praktickém měření. V neposlední řadě bych rád poděkoval rodině, která mě při studiu velmi podporovala a pomáhala ve všech životních situacích.

OBSAH

Úvod	10
1 Sendvičové konstrukce	11
1.1 Potahy	12
1.1.1 Kompozitní potahy	12
1.1.2 Kovové potahy.....	14
1.2 Jádra	14
1.2.1 Pěnová jádra	14
1.2.2 Voštinová jádra.....	15
1.2.3 Balza	16
1.3 Kombinace potahů a voštinových jader	17
1.4 Lepení složek sendviče	17
1.4.1 Druhy lepidel	17
1.5 Lepení a vliv prostředí na lepidla	18
1.6 Zkoušení sendvičových konstrukcí.....	22
1.7 Označování voštin.....	25
2 Zkoušky sendvičů po stárnutí	27
2.1 Specifikace zkoušených sendvičů.....	27
2.2 Výsledky v roce 2001	27
2.2.1 Metodika zkoušek.....	27
2.2.2 Výsledky.....	29
2.3 Výsledky po 15 -ti letech	30
2.3.1 Metodika zkoušek tlakové pevnosti	30
2.3.2 Výsledky tlakové pevnosti po 15 -ti letech	31
2.3.3 Validace dat tlakové pevnosti.....	33
2.3.4 Metodika zkoušek modulu pružnosti ve smyku	37
2.3.5 Výsledky modulu pružnosti ve smyku po 15 -ti letech	38
2.3.6 Validace dat modulu pružnosti ve smyku.....	42
2.4 Umělé stárnutí vzorků po 15 -ti letech v solné atmosféře	46
2.4.1 Výsledky po stárnutí v atmosféře nasycené solí.....	47
2.4.2 Validace dat modulu ve smyku po stárnutí v atmosféře nasycené solí	48
2.5 Umělé stárnutí vzorků po 15 -ti letech ve vlhkém teple	51
2.5.1 Výsledky pevnosti v tlaku vzorků stárnutých ve vlhkém teple	51
2.5.2 Validace dat tlakové pevnosti po stárnutí v atmosféře vlhkého tepla	51
2.5.3 Výsledky po stárnutí v atmosféře vlhkého tepla	53
2.5.4 Validace dat smykového modulu po stárnutí v atmosféře vlhkého tepla.....	55

2.5.5	Porovnání výsledků vlhkého tepla a dat měření korekce	58
2.6	Porovnání smykového modulu dle typů a směrů voštin	59
Závěr	.....	62
Seznam použitých zkratk a symbolů	.....	66
Seznam obrázků	.....	67
Seznam tabulek	.....	69
Seznam příloh	.....	70

ÚVOD

Sendvičové konstrukce se dočkaly významného použití ve II. světové válce u letounu „de Havilland Mosquito“. Tato konstrukce nebyla ale použita záměrně, příčina byla v nedostatku jiných materiálů. Potah byl vyroben z dýhy (bříza) a jádro z balzového dřeva. Později, v poválečném období dochází k rozšiřování kovových sendvičových konstrukcí, nicméně v této době je hlavním nepřítelem koroze. [1]

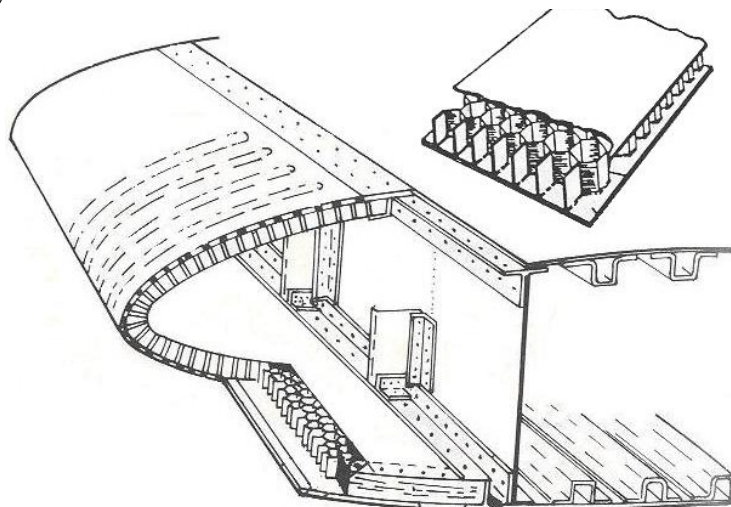
S narůstajícím počtem cestujících a objemem přepravovaného nákladu získává letecká přeprava stále více na důležitosti. Tak jako každý výrobce, i výrobci letounů a leteckého vybavení, se snaží co nejvíce snížit nejen výrobní náklady, ale i náklady na následný provoz a údržbu svého zařízení.

Jedním z mnoha opatření vedoucí ke snížení nákladů jsou sendvičové konstrukce. Řeší úsporu hmotnosti při vyšší tuhosti daného konstrukčního prvku, zpravidla je vyšší i únavová životnost dané části konstrukce. Typická sendvičová konstrukce je zobrazena na obr.1.

Jak známo, snížení hmotnosti konstrukce je velmi významné a důležité především po finanční stránce. Takto ušetřená hmotnost může být využita pro rozšíření objemu přepravovaného nákladu. Současně snížení hmotnosti vede k úspoře paliva → snížení ceny přepravy/ palubního lístku. Pokud se zvýší i únavová životnost konstrukce, letounu se prodlouží doba provozuschopnosti. Tyto zmíněné skutečnosti nadále dramaticky ovlivňují trh s nabídkou a poptávkou.

Použití sendvičových konstrukcí je velmi široké, např. letectví: křídélka, vodorovné ocasní plochy, klapky, kabiny, sloty, odtokové hrany, podlahy, dveře, svislé ocasní plochy, stabilizátory, obraceče tahu atd. Těchto materiálů je využíváno taktéž na výrobu částí helikoptér, satelitů, raketoplánů a vesmírných vozítek. Mimo letecký průmysl je použití samozřejmě rozšířeno i v automobilovém průmyslu, drážním průmyslu, námořním průmyslu a v dalších oborech. V automobilovém průmyslu se sendvičové konstrukce používají jako absorbéry energie při nehodě, kdy z těchto materiálů mohou být vyrobeny sloupky i střecha automobilu. Drážní průmysl využívá materiály k výrobě dveří, podlah, absorbérů energie při nehodě, stropů a přepážek. Námořní průmysl vyrábí ze sendvičů stěny, stropy kajut, přepážky a rovněž celá plavidla.

Další použití těchto materiálů mimo dopravu je následující: různé externí architektonické panely, usměrňovače vzduchu, vody, lyže, snowboardy, energii pohlcující ochranné prvky, akustické bariéry atd....

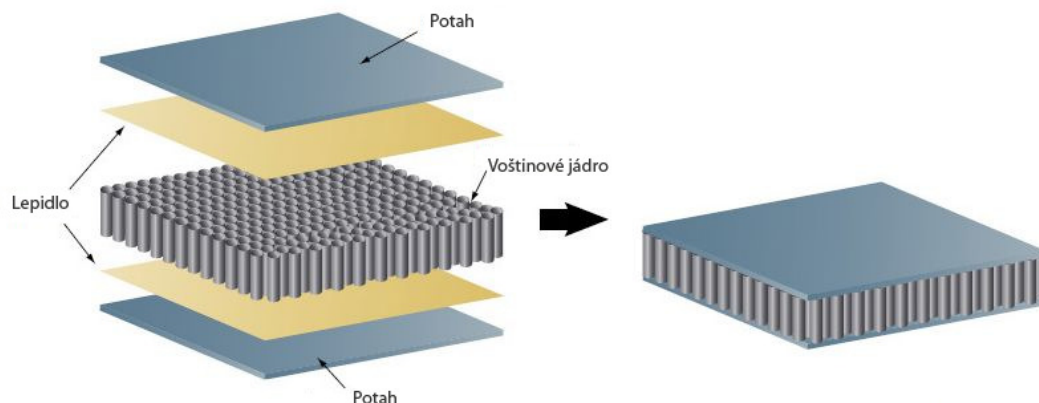


Obr. 1 Sendvičová konstrukce [2]

1 SENDVIČOVÉ KONSTRUKCE

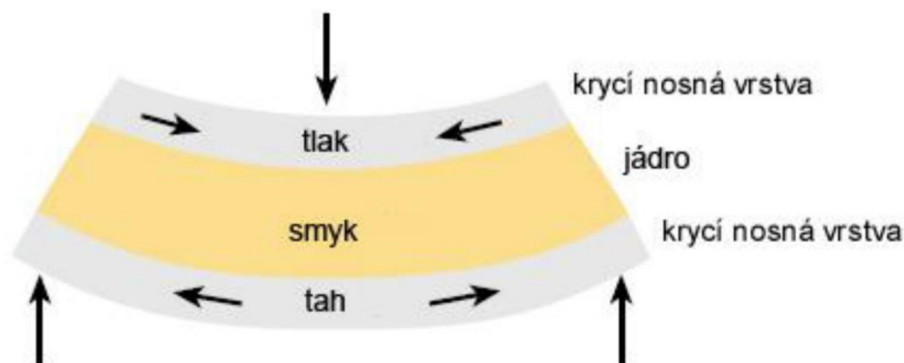
Vrstevnaté konstrukce, které jsou tvořeny rozdílnými typy jednoduchých nebo složených materiálů různých vlastností. Spojení jednotlivých částí je vzájemně nerozebíratelné. [3]

Sendvičové panely se skládají ze složek zobrazených na obr.2.



Obr. 2 Skladba sendvičového panelu [2]

Sendvič je tvořen dvěma vnějšími vrstvami (potah) s vysokou pevností a tuhostí, zatěžovanými tahovými a tlakovými silami, viz. obr.3. Jádro o nízké hustotě přenáší smykové síly působící mezi dvěma potahy. Pevnost sendviče v tlaku je především závislá na pevnosti jádra v tlaku. Pevnost v tlaku jádra roste s jeho hustotou, rovněž ale roste i hmotnost celého panelu. [3]



Obr. 3 Zobrazení složek namáhání při ohybu [3]

Důvody, které vedou k použití sendvičových konstrukcí, jsou následující:

- Vysoká ohybová pevnost a tuhost
- Únavová odolnost
- Odolnost proti šíření trhlin
- Odolnost proti rázům
- Tepelná odolnost a odolnost proti ohni
- Pohlčení deformační energie při nárazu [3]

Na obrázku 4 je uvedeno srovnání celistvého materiálu a sendvičového panelu se zvětšující se tloušťkou jádra. Z následujícího obrázku vyplývá, že vhodnou volbou tloušťky jádra docílíme značného zvýšení tuhosti a pevnosti v ohybu při zachování nízké hmotnosti.

	Celistvý materiál	Síla jádra t	Síla jádra $3t$
tuhost	1.0	7.0	37.0
pevnost v ohybu	1.0	3.5	9.2
hmotnost	1.0	1.03	1.06

Obr. 4 Porovnání pevnosti a tuhosti v ohybu [4]

1.1 POTAHY

Na vnější vrstvy sendvičových panelů se nejčastěji používají lamináty vyztužené **skleněnými** nebo **uhlíkovými** vlákny, popřípadě **kovové** potahy (hliník atd.). Pro optimální splnění funkce sendviče musí být potah k jádru dokonale připojen. Tento úkol splňují matrice potahu nebo speciální fóliová lepidla. Vzniklá konstrukce je velmi tuhá a je schopna odolat dynamickému namáhání a rázům. [3]

1.1.1 KOMPOZITNÍ POTAHY

Matrice

Matrice je materiál, který obklopuje vyztužující fázi tvořenou vlákny či částicemi tak, že po spojení vznikne tvarově stálý výrobek, který se nazývá kompozit. [6]

Hlavní funkce matrice:

- váže vlákna dohromady
- umožňuje přenos zatížení mezi jednotlivými vlákny
- chrání vlákna před vlivem prostředí
- určuje další vlastnosti kompozitu (teplotní a chemická odolnost, odolnost proti stárnutí, elektrické vlastnosti, smrštění při vytvrzování)
- při tahovém namáhání kompozitu se nesmí porušit dříve než vlákno [7]

Polymerní matrice

V dnešní době jsou nejvíce vyráběné kompozity na bázi polymerní matrice vyztužené dlouhými vlákny. Vysoké hodnoty poměru modulu pružnosti k hustotě (měrný modul E/ρ_k) a pevnosti v tahu k hustotě (měrná pevnost R_m/ρ_k) předurčují polymerní kompozity jako velmi vhodné materiály pro dopravní prostředky. [6]

V konstrukci letadel mají největší význam především polymerní matrice s dlouhými vyztužnými vlákny.

Reaktoplastové polymerní matrice

Epoxidové pryskyřice

- v leteckých aplikacích mají výhradní zastoupení
- dobrá koheze a adheze k většině vláken
- vytvrzování za nízkých teplot a tlaků – běžně do 125 °C
- malé smrštění při vytvrzování a malé vnitřní napětí
- velmi dobrá technologická zpracovatelnost [7]

Fenolické pryskyřice

- hlavně tam, kde se vyžaduje odolnost proti hoření a nízký vývin kouře (vnitřní vybavení dopravních prostředků)
- nižší mechanické vlastnosti
- odolnost do 280 °C za sucha [7]

Výztuže potahů

Nejvíce používaná vlákna vyztužující kompozit jsou skleněná, uhlíková a aramidová.

Hlavní funkce vláken:

- přenášejí zatížení
- ovlivňují hlavně mechanické vlastnosti výsledného kompozitu
- největší účinek mají dlouhá (spojitá) vlákna, např. u laminátů nebo pultruzních polotovarů [7]

Uhlíková vlákna (průměr 5–8 μm)

- velmi dobré mechanické vlastnosti (pevnost, modul pružnosti), nízká hustota → nejdůležitější vlákna pro primární letecké konstrukce
- křehká, vysoká cena, nad 400 °C intenzivní oxidace [7]

Skleněná vlákna (průměr 5–20 μm)

- nejlevnější, vysoká pevnost, nehořlavá, malá tepelná roztažnost
- křehká, nízký modul pružnosti, větší hustota (hmotnost)
- nosné konstrukce kluzáků a lehkých letadel a nenosné konstrukce u ostatních letadel [7]

Aramidová vlákna – aromatický polyamid (průměr 12 μm)

- nejnižší hustota, vysoká tahová pevnost a odolnost rázovému namáhání, chemická odolnost
- pohlcování vlhkosti, nízká pevnost v tlaku, degradace při slunečním záření
- nejznámější obchodní značka – Kevlar [7]

1.1.2 KOVOVÉ POTAHY

Slitiny hliníku

- používají se nejčastěji slitiny ve složení Al-Cu, Al-Cu-Mg (duraly – 2024,2014), korozní odolnost a tavné svařování negativně ovlivněné obsahem Cu
- slitiny Al-Zn-Mg-Cu, nejpevnější konstrukční slitiny, vyšší pevnost oproti duralům, nejuniverzálnější slitina 7075

Titan

- na výrobu potahů je použit titan technické čistoty, pevnost a teplotní odolnost vyšší než u slitin hliníku, rovněž mají vyšší odolnost proti korozi, použití do rychlostí M2,5

1.2 JÁDRA

Primární funkce jádra v sendvičové konstrukci je stabilizace potahu a přenos smykového zatížení. Proto, aby přenos zatížení byl efektivní, musí být jádro dostatečně tuhé a zároveň lehké. Pěnová jádra při stejné hustotě mají horší mechanické vlastnosti než voštinová jádra. Při výběru vhodného jádra sendvičového panelu je nutné zohlednit jak jeho použití a mechanické vlastnosti, tak zvolenou výrobní technologii, která je pro daný případ nejvhodnější. Nejčastěji jsou používány tuhé pěny či voštiny. [3]

1.2.1 PĚNOVÁ JÁDRA

Použití pěnových jader se v dnešní době začíná rozšiřovat. Za jejich rozšířením stojí rychlá a levná výroba. Jsou vyráběna z mnoha druhů syntetických polymerů – PVC, PU, PEI, SAN atd... Hustota těchto jader se nejběžněji pohybuje od 40 kg/m^3 do 200 kg/m^3 , ale jsou pěny s hustotou až do 420 kg/m^3 , ukázkou může být obr. 5. Vyráběné tloušťky jsou od 2 do 50 mm dle požadavku. Tyto materiály jsou izotropní, což je velice důležité v tom směru, že můžeme uvažovat ve všech směrech stejné vlastnosti. Jelikož pěny obsahují ve své struktuře dutiny, mají dobrý poměr tlakové pevnosti vzhledem k hmotnosti. Velmi dobře absorbují rázovou energii a tlumí kmity. Po zahřátí je možné některé pěny tvarovat. [8]



Obr. 5 Polymerní pěny [21]

Polyvinylchloridová pěna – PVC

Často používaná pěna, vyvážená kombinace statických a dynamických vlastností, taktéž odolnosti proti absorpci vody a chemikáliím. Teplotní rozsah použití od $-240\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jsou vysoce hořlavé, nehořlavost se zvyšuje retardéry hoření. [8]

Polyuretanová pěna – PUR

Průměrné mechanické vlastnosti. Po delší době může dojít k odtržení jádra z důvodu zhoršené přilnavosti pryskyřice. Používá se především jako tepelná a zvuková izolace. Tuto pěnu lze použít i při zvýšených teplotách ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$) [8]

Polystyrenová pěna – PS

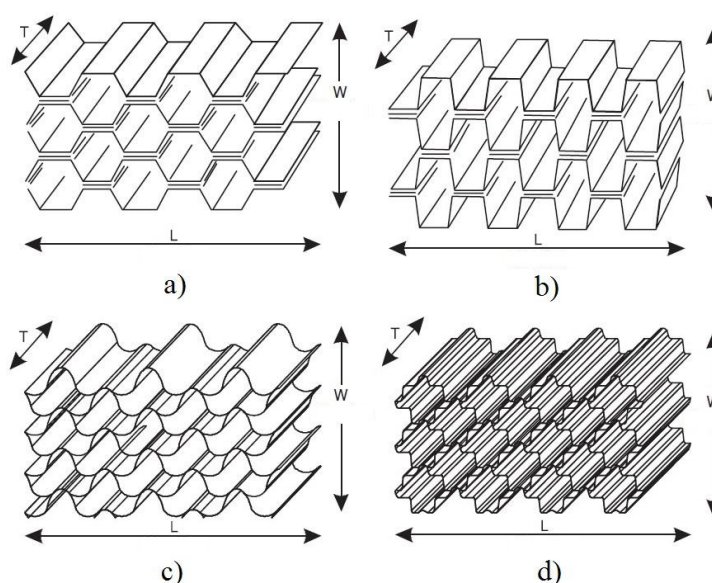
Obvyklé použití je na nenamáhané prvky, například malé plavidlo či surf. Hlavní přednosti jsou nízká cena a snadná formovatelnost, hustota se pohybuje okolo 40 kg/m^3 . Nemohou se používat v kombinaci s polyesterovými pryskyřicemi, poněvadž by došlo k rozpuštění. [8]

Další používané pěny uvedeny pouze výčtem: Polyetherimidová pěna – PEI, Polyethylentereftalátová pěna – PET, Polyethersulfone pěna – PES, Styrenakrylonitrilové kopolymerní pěny – SAN, Polymetakrylimidové pěny – PMI. [9][10]

1.2.2 VOŠTINOVÁ JÁDRA

Primární funkcí jádra je stabilizace potahů a přenos většiny smykového zatížení. Jádro musí být dostatečně tuhé, ale zároveň lehké. [15]

Základní tvar buněk je šestiúhelníkový, ale pro speciální aplikace se používají i další uvedené tvary buněk viz. obr.6. Důležité parametry jako velikost buňky, tloušťka stěny a materiál voštiny mají výrazný vliv na mechanické vlastnosti. Voštinová jádra jsou vyráběna v rozmanitých materiálových variantách. [16]



Obr. 6 a) šestihranná voština, b) OX voština, c) vlnitá voština, d) dvojitě vlnitá voština [16]

1.2.2.1 HLINÍK

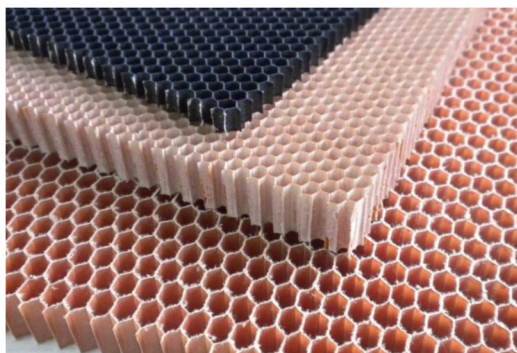
Hliníková voština (obr.7) má vysoký poměr pevnosti a hmotnosti. Existuje mnoho konfigurací na lepení hliníkových folií, které vedou k různým geometrickým tvarům buněk. V letectví ale nejčastěji používaný tvar buňky je šestihranný. Jako materiál buněk se používá čistý hliník, 3003 (Al-Mn), 5052 (Al-Mg) nebo 5056. Tyto voštiny se vyrábí expanzní metodou. Při použití hliníkové voštiny je třeba dbát určitých pravidel: při kontaktu s uhlíkovými potahy existuje nebezpečí galvanické koroze a vznik nespojitosti mezi potahem a jádrem při nárazu nebo při použití ve slaném prostředí (provoz lodí, či letiště umístěné na pobřeží). [17]



Obr. 7 Hliníková voština [19]

1.2.2.2 NOMEX

Je vyrobena z papíru Nomex (komerční název). Tento nomexový papír, sestává z aramidových vláken. Papírová voština (obr.8) se obvykle ponoří do fenolické nebo do polyimidové pryskyřice, tím vznikne voštinové jádro s vysokou pevností a velmi dobrou odolností proti ohni. U letadel se často používají jako lehké interiérové panely. Nomex voština se stává stále používanějším materiálem u více namáhaných neleteckých komponentů díky svým výborným mechanickým vlastnostem, nízké hustotě a dobré dlouhodobé stabilitě. Nicméně je podstatně dražší než jiné používané materiály. [17]



Obr. 8 Nomexová voština [20]

1.2.2.3 SKLENĚNÁ TKANINA

Impregnují se fenolickou pryskyřicí, dobře odolávají vlivům okolního prostředí. Jejich pevnost je srovnatelná se slitinou 5052. [17]

1.2.3 BALZA

Balza je přírodní materiál s podlouhlými uzavřenými buňkami. Je dostupná v mnoha různých variantách týkající se struktury a fyzikálních charakteristik.

Oproti polymerním pěným teplem neměkne a zároveň se vyznačuje menší tepelnou vodivostí. Nevýhodou použití balzy je pohlcování vlhkosti. [18]

1.3 KOMBINACE POTAHŮ A VOŠTINOVÝCH JADER

Tab. 1 Srovnání použití druhů jader a potahů [5]

Složení panelu	Charakteristika
Al jádro + Al potah	Střední hmotnost a tuhost při nízkých nákladech
Al jádro + více směrový kompozitní potah ze skleněných vláken	Lehčí, ale méně tužší než Al potah při nižších nákladech
Nomexové jádro + jednosměrný nebo více směrový kompozitní potah ze skleněných vláken	Odolnější a nákladnější než panely s Al jádrem. Jednosměrně uspořádaná vlákna dávají vyšší tuhost při vyšších nákladech než více směrové uspořádání.
Nomexové jádro + jednosměrný nebo více směrový kompozitní potah z uhlíkových vláken	Nejlehčí a nejtuzší panely, kterým odpovídají nevyšší náklady.

1.4 LEPENÍ SLOŽEK SENDVIČE

Volba lepidla je závislá nejen na kombinaci materiálu potahu a jádra, ale také na typu jádra (voština, pěna). U voštinových jader je malá styková plocha s potahem, proto je důležitým parametrem viskozita lepidla, která musí zabezpečit tvorbu koutového spoje a současně zabránit stékání lepidla do dutin buněk.

Velký význam má použití foliových lepidel, která lze vytvrzovat za tepla současně s vytvrzováním prepregových potahů. Použití foliových lepidel je rovněž velmi rozšířeno např. i pro lepení hliníkového jádra a potahu. V případě tzv. mokré laminace může pro spojení s pěnovým jádrem sloužit přímo tekutá matrice kompozitního materiálu.

1.4.1 DRUHY LEPIDEL

Fenolické s vinyly

Mají nejlepší odolnost vlivu okolního prostředí.

Epoxidové

Použití jen tam, kde je požadována vysoká pevnost, odolnost vůči vysokým teplotám. Při vytvrzování je důležitá ventilace, či perforace, aby vznikající plyny mohly být odvedeny pryč. [15]

Epoxidové modifikované polymery

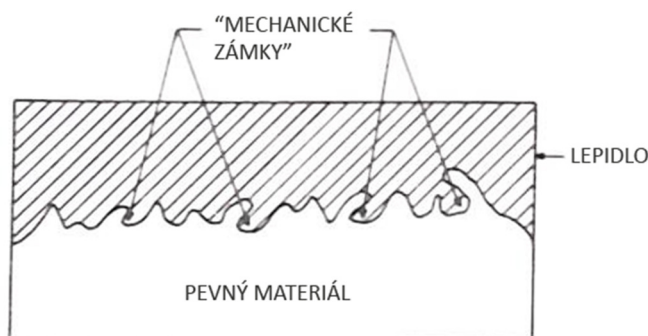
Tato lepidla byla první, která měla excelentní vyplňování rohů, mají vysokou pevnost, ale jsou náchylná k absorpci vlhkosti. [15]

1.5 LEPENÍ A VLIV PROSTŘEDÍ NA LEPIDLA

Kapitola vlivu prostředí je zde probírána z následujícího důvodu. Lepidlo v sendvičové konstrukci zaujímá poměrně významný podíl. Nejen že jsou přilepeny potahy k voštinovému jádru, ale voštinové jádro samotné je lepeno z jednotlivých proužků folie, což je zobrazeno na obr.12. Toto je důvod, proč je nutné se zabývat vlivy prostředí na lepidlo (lepený spoj) a následně zkoumat, jaký je dopad.

Počáteční pevnost spoje a následná odolnost lepeného spoje silně závisí na interakci lepidla a adherendu. Uplatňují se dva mechanismy adheze:

- a) „mechanické zámky“ (polymerního lepidla s mikroskopickými nerovnostmi adherendu obr.9). Velkou roli zde hraje pórovitost a drsnost povrchu. [28]



Obr. 9 Znárodnění "mechanických zámek" [28]

- b) chemická vazba k samotnému adherendu (kovalentní nebo van der Waalsova vazba). Velikost a relativní důležitost obou těchto interakcí je silně závislá na kvalitě povrchu před lepením a chemických vlastnostech lepidla. [28]

Na kvalitu lepeného spoje má výrazný vliv příprava povrchu adherendu:

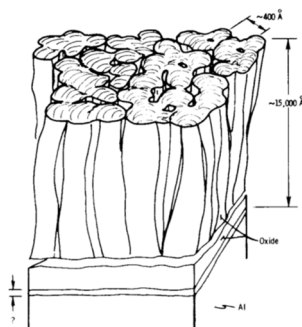
- Pevnost a životnost lepeného spoje závisí na interakci mezi lepidlem a adherendem.
- Příprava povrchu ovlivňuje adhezi – mechanické zakotvení lepidla do drsného povrchu adherendu i chemické spojení molekul lepidla s adherendem. [28]
- Složitost přípravy povrchu závisí na požadovaných mechanických vlastnostech a liší se podle druhu adherendu. [28]
- Nutnou operací přípravy je odmaštění, někdy postačí mechanické zdrsňení povrchu (méně náročné aplikace), pro nejnáročnější aplikace je nutná chemická úprava povrchu. [28]

Hliníkové adherendy

Pro letecké aplikace se připravují buď leptáním nebo anodizací v kyselinách. Pro méně namáhané díly s menší odolností postačí mechanické opracování. Povrch adherendů se připravuje následujícími způsoby: [28]

- a) leptání (kyseliny sírové a dvojchromanu sodného) - FPL, nejstarší způsob přípravy adherendů v roztoku

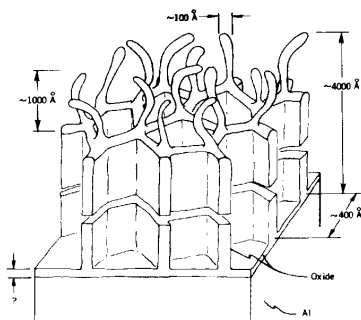
b) anodizace kyselinou chromovou – CAA (obr.10),



Obr. 10 Schema oxidického filmu - CAA [28]

Anodizace kyselinou chromovou (CAA) je široce používána pro zlepšení odolnosti proti korozi. Tento postup je aplikován nejen na Al-slítiny, ale i na jiné kovové materiály. [28]

c) anodizace kyselinou fosforečnou – PAA (obr.11). [28]



Obr. 11 Schema oxidického filmu - PAA [28]

Anodizace kyselinou fosforovou (PAA) byla vyvinuta firmou Boeing na konci 60 -tých let. Takto ošetřené adherendy skvěle odolávají vlhkému prostředí ve srovnání s leptáním (FPL), při použití epoxidových lepidel je tento rozdíl ještě větší. [28]

Postup

Počáteční odmaštění odstraní velké organické znečištění, zatímco alkalické odmaštění odstraní oxidické povlaky vytvořené během tepelného zpracování (např. při válcování). Tyto oxidické povlaky zůstávají nepoškozeny během leptání (FPL). [28]

Anodizace kyselinou fosforečnou – PAA má větší mikro drsnost než leptání FPL. Jedná se o vytvoření sítě pórů, whiskery vystupující z těchto pórů adherendu se nabízí jako potencionální „mechanické zámky“, což vede ke zvýšení pevnosti a odolnosti spoje. V případě využití „mechanických zámek“ je nejlepší metoda anodizace kyselinou fosforečnou. [28]

Výhodou použití anodizace kyselinou chromovou - CAA je, že povrch je méně „drolivý“, tudíž je méně náchylný k mechanickému poškození. [28]

Odolnost lepeného spoje

Naprostá většina poruch v hliníkových lepených spojích použitých na letadlech byla iniciována vlhkostí. Z toho následně vyplynulo zavedení a použití zrychleného (umělého) stárnutí konstrukcí v různých agresivních prostředích a jejich testování při různých zatíženích (tlak, tah, ohyb, smyk, ...)

Na lepené spoje, a tedy i na výsledné vlastnosti má velký vliv okolní prostředí: [28]

- **Vliv teploty** – degradace lepidla, ztráta mechanických vlastností, předčasný lom
- **Vliv vlhkosti** – nejběžnější médium je voda, negativně ovlivňuje vlastnosti lepidla nebo rozhraní mezi lepidlem a adherendem (koroze)
- **Vliv napětí** – při dynamickém cyklickém namáhání dochází k porušení spoje při podstatně nižším napětí než při statickém zatížení
- **Vliv záření** – téměř vždy dochází k degradaci lepidel při dlouhodobém působení např. slunečního záření
- **Vliv soli a prostředí nasyceného solí** – slaná voda, či slaná mlha snižuje životnost lepených spojů – především v případě kovových adherendů (koroze na rozhraní)
 - jedná se o velice běžný jev, letouny jsou provozovány v přímořských oblastech

Atmosférické podmínky

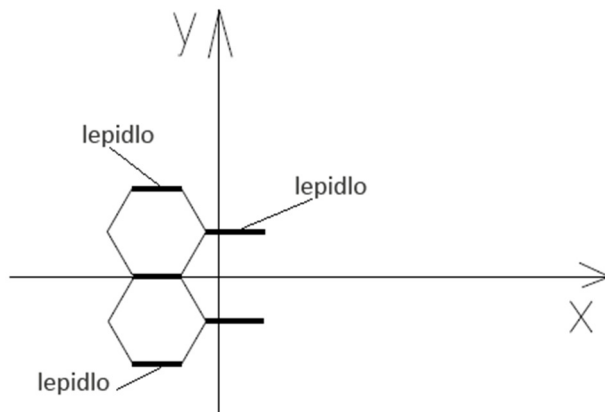
Při posuzování atmosférických vlivů nelze jednoznačně stanovit velikost dopadu na konstrukci. Bylo provedeno mnoho zkoušek na různých místech planety. Tím, že je prostředí na různých místech velmi rozdílné, jsou rozdílné i výsledky měření. Na některých místech je suché teplo, na jiných vlhké teplo, případně na jednom místě je vyšší vlhkost než na jiném. Jednoznačně lze ale prohlásit, že nejsilnější vliv na lepené spoje má slané prostředí (přímořská atmosféra). Tento jev je patrný z následujících tabulek 2 a 3. Tabulky též zobrazují, jaká úprava povrchu před lepením je nejvhodnější. [28]

Tab. 2 Odolnost spojů při různém ošetření povrchů adherendů [28]

Hliníkový adherend 6061-T6, lepidlo dvě strany, pokojová teplota vytvrzení, polyamid-epoxid

Odolnost různých ošetření povrchu při použití vytvrzení lepidla za pokojové teploty na hliníkových adherendech								
Stav vzorku	Průmyslová atmosféra [MPa]				Přímořská atmosféra [MPa]			
	Poč.	2 roky	4 roky	8 let	Poč.	2 roky	4 roky	8 let
Odmaštěno v páře	13.57	10.54	8.72	6.25	13.57	0	0	0
Kyselina chromová, leptáno	19.5	19.98	18.82	16.33	19.5	0	0	0
Chromátováno (povlak)	8.68	8.47	8.35	7.79	8.68	5.76	2.96	0
Anodizace kyselinou fosforečnou	18.33	17.02	16.88	14.68	18.33	0	0	0
Anodizace kyselinou sírovou	17.43	14.68	12.87	11.65	17.43	11.44	11.64	11.21

Je známo, že složení sendvičového panelu je: potah – lepidlo – jádro – lepidlo – potah. Ale v našem případě i samotné voštinové jádro je lepeno z jednotlivých proužků hliníku. Díky tomu je poměr lepidla ve voštinovém jádru velký a stárnutí lepidla se projevuje více, než by tomu mohlo být za přítomnosti např. pěnového jádra viz. obr.12.



Obr. 12 Schematické zobrazení lepení voštinového jádra

Tab. 3 Odolnost spojů při různém ošetření povrchů adherentů [28]

Hliníkový adherent 6061-T6, lepidlo jedna strana, zvýšená teplota vytvrzení, nitril-epoxid

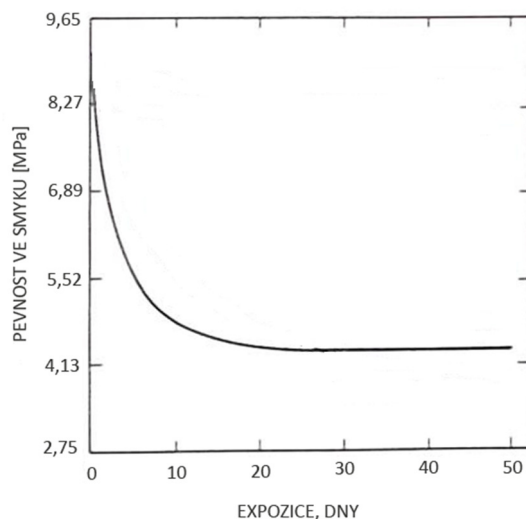
Odolnost různých ošetření povrchu při použití tepelného vytvrzení lepidla na hliníkových adheredech								
Stav vzorku	Průmyslová atmosféra [MPa]				Přímořská atmosféra [MPa]			
	Poč.	2 roky	4 roky	8 let	Poč.	2 roky	4 roky	8 let
Odmaštěno v páře	29.83	21.36	14.4	3.1	29.83	0	0	0
Kyselina chromová, leptáno	36.72	36.52	34.52	32.58	36.72	23.22	0	0
Chromátováno (povlak)	18.4	17.91	18.81	19.09	18.4	18.36	18.81	17.78

Vliv vody na lepené spoje

Voda je dominantní faktor ovlivňující lepené spoje ve spojitosti s vlivem prostředí. Prvním faktorem je vliv vody na samotné lepidlo, dalším nezanedbatelným jevem je koroze. Jak je známo, kovové materiály ve vlhkém prostředí korodují, pokud tato koroze nastává na rozhraní lepila a adherentu, musí zákonitě dojít k odpevnování lepeného spoje. [28]

Rychlost degradace lepeného spoje je taktéž závislá na použité technologii přípravy adherentu. Pevnost spojů (po ovlivnění vodou), kdy byla použita technologie leptání nebo mechanického zdrsňení je mnohem nižší než u spojů, které byly ošetřeny anodizací.

Pokud je spoj krátkodobě vystaven působení vody (vlhkosti), může být vysušen a jeho mechanické vlastnosti budou téměř stejné, jako byly před kontaktem s „agresivním prostředím“. Pokud je ale spoj vystaven tomuto prostředí dlouhodobě, dochází ke snížení mechanických vlastností nenávratně. Obecně je příprava povrchu adherentu velmi důležitá, čím „lepší“ povrchová úprava, tím vyšší odolnost a pevnost spoje. [28]



Obr. 13 Změna mechanických vlastností lepeného spoje při ponoření do vody [28]

Na obrázku 13 je zobrazen pokles pevnosti ve smyku při ponoření do vody (pouze ilustrační příklad). Jedná se o spoj hliník – epoxid, na tomto obrázku je demonstrován vliv prostředí na pokles mechanických vlastností. V tomto případě se jedná o prostý lepený spoj. I přesto je ale získán předpoklad o tom, co by mohlo nastat v sendvičové konstrukci při působení okolního prostředí.

Vliv slané vody na lepené spoje

Především u kovových materiálů nastává velmi výrazná koroze. Zkoušky materiálů se provádí, buď ponořením do roztoku vody a NaCl nebo může být použita solná mlha. Toto prostředí je velmi podobné a běžné pro letouny pohybující se v přímořských oblastech. Tento vliv může být zkoumán i při vyšších teplotách, než je pokojová teplota. [28]

1.6 ZKOUŠENÍ SENDVIČOVÝCH KONSTRUKCÍ

U sendvičových konstrukcí se provádí následující zkoušky:

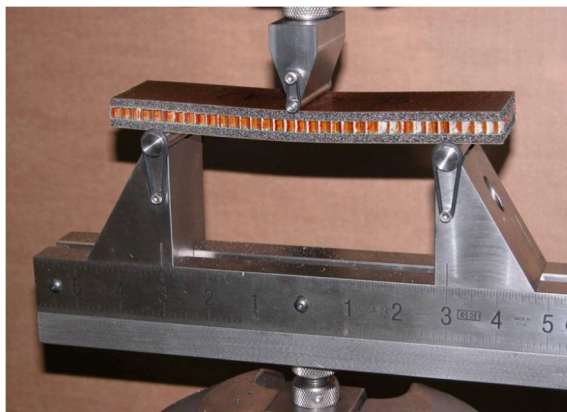
- Zkouška v tlaku
- Zkouška v tahu
- Zkouška v ohybu
- Zkouška ve smyku
- Zkouška v odlupování

Zkouška v tlaku

Vzorek je zatížen ve směru rovnoběžném s osami buněk voštinového jádra. Zjišťujeme mez pevnosti v tlaku R_d (maximální síla/celkový příčný průřez). Tato zkouška se provádí na nestabilizované voštině (samostatná voština), ale i na stabilizované voštině (oboustranně vyztužená potahem). Charakteristické rozměry vzorku 75x75x17mm. Zkoušku podrobněji definuje např. norma ASTM C365. [22]

Zkouška v ohybu

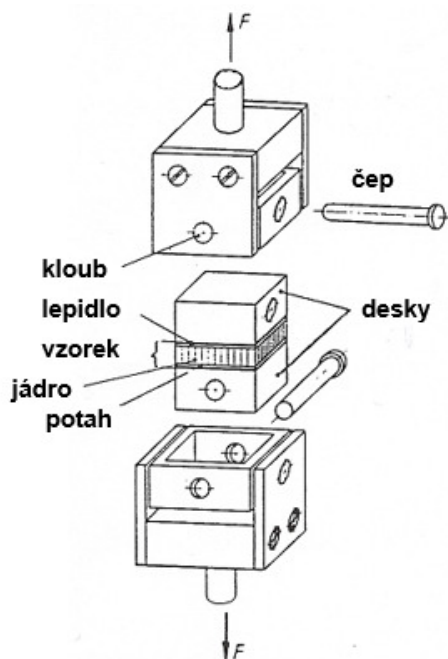
Zobrazena na obr.14 patří do statických zkoušek a může být prováděna jak za normální (pokojové) teploty, tak za zvýšené teploty. Ohybový moment vyvozený od příčnicku způsobí v horních vláknech průřezu tlak a ve spodních vláknech tah. Charakteristické rozměry vzorku 200x75x17mm. Zkoušku podrobněji definuje např. norma ASTM C393. [25]



Obr. 14 Schema tří bodové zkoušky v ohybu [25]

Zkouška v tahu

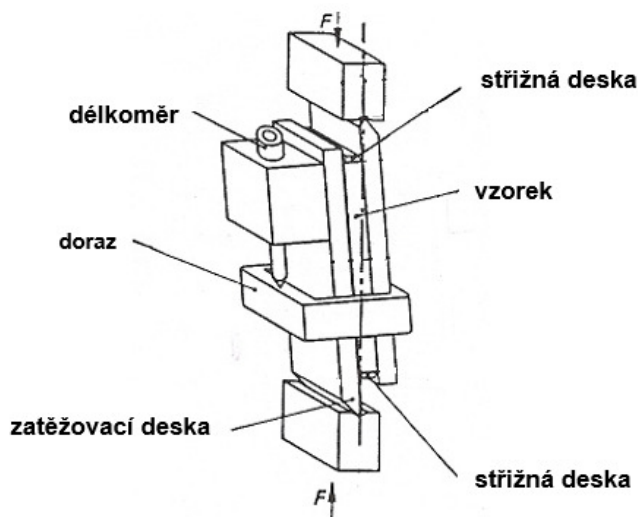
Zkouška je schematicky zobrazena na obr.15. Vzorky jsou nalepeny mezi zatěžovací desky. Zkouší se pevnost jádra nebo lepeného spoje. Tato zkouška je velice náročná na přípravu. Desky musí být pečlivě očištěny, odmaštěny, pak se nalepí vzorek, který je zatěžován přes kloubové uchycení, aby se eliminovaly jakékoliv nepřesnosti a nevnašela se do měření chyba. Charakteristické rozměry vzorku 50x50x17mm. Tuto zkoušku dále podrobněji definuje např. norma DIN 53 292. [22]



Obr. 15 Schema zkoušky v tahu [22]

Zkouška ve smyku

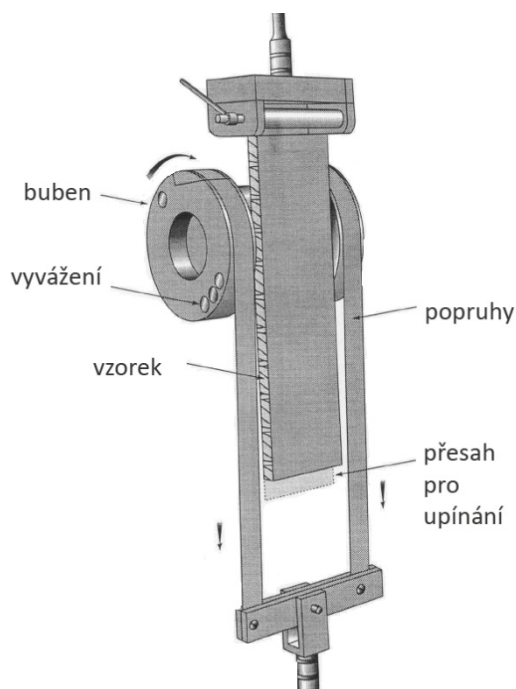
Zkouška je schematicky zobrazena na obr.16. Smykovou zkouškou určíme smykovou pevnost a smykový modul. Průběh zkoušky je zřejmý z obrázku 16. Tato zkouška stejně jako zkouška v tahu je náročná na přípravu, kdy se musí každý vzorek nalepit na očištěné zátěžové desky. Charakteristické rozměry vzorku 254x51x16mm. Tuto zkoušku dále podrobněji definuje například norma ASTM C 273-16. [22]



Obr. 16 Schema zkoušky ve smyku [22]

Zkouška v odlupování

Zkouška je schematicky zobrazena na obr.17. Podstatou zkoušky je namáhání zkušebního spoje odlupováním statickým tahem ve směru kolmém na lepenou plochu. Tato metoda se používá pro zejména relativně tenké vnější vrstvy. Měří se odlupovací moment. Charakteristické rozměry vzorku 305x76x25mm. Tuto zkoušku dále podrobněji definuje např. norma ASTM D 1781. [24]



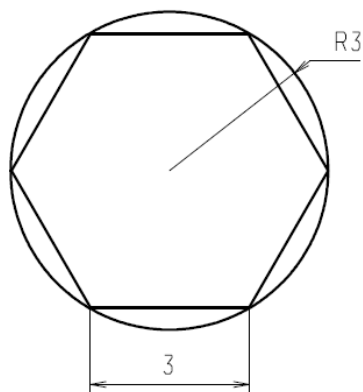
Obr. 17 Schema zkoušky v odlupování [23]

1.7 OZNAČOVÁNÍ VOŠTIN

Původní označování voštin v ČR

Nechť je příkladem voština 3.080, zobrazena na obr.18.

První číslice – 3 označuje velikost buňky. Poloměr opsané kružnice šestiúhelníku buňky má rozměr 3 mm.

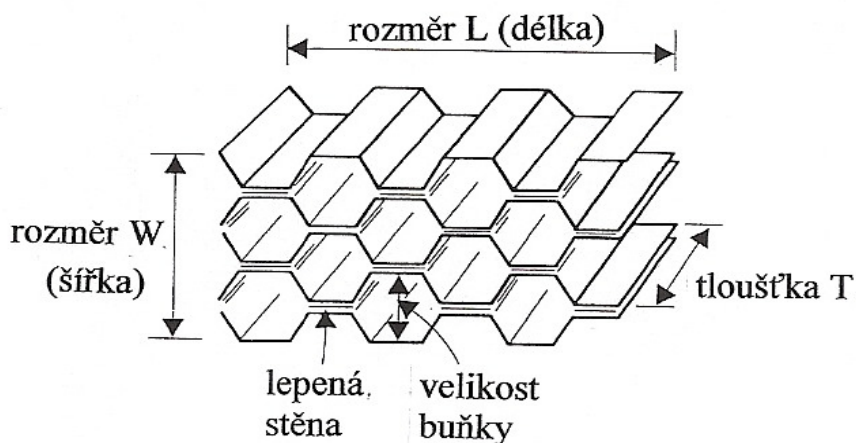


Obr. 18 Velikost buňky

Číslice za tečkou charakterizují hustotu buněk. V tomto případě je hustota 80 kg/m^3 .

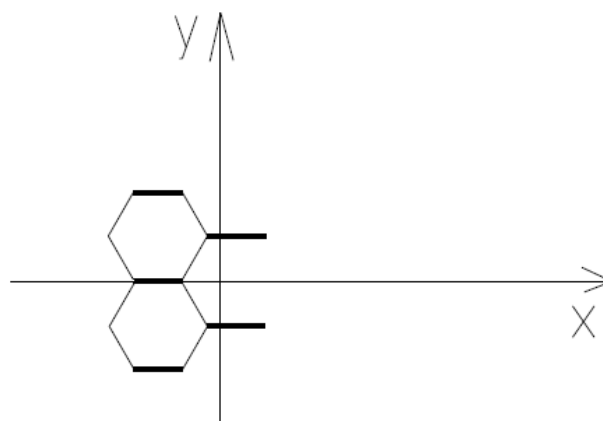
Běžné mezinárodní označování voštin

Velikost buňky je vzdálenost protilehlých lepených stěn buňky viz. obr.19.



Obr. 19 Rozměrové značení voštinového jádra [17]

Je nutné vzít v úvahu podélný a příčný směr. Přiléhající stěny jednotlivých buněk jsou zdvojeny viz. obr.20, tento fakt se dramaticky podílí na výsledném odporu proti deformaci. Toto vede k závěru, že jsou zkoušeny zvláště vzorky s podélným a příčným uspořádáním. Voština s uspořádáním v podélném směru snese vyšší zatížení.



Obr. 20 Zdvojení stěny buňky při lepení

2 ZKOUŠKY SENDVIČŮ PO STÁRNUTÍ

Tato práce navazuje na rozsáhlé zkoušky z roku 2001, kdy nebyly využity všechny vzorky. Na těchto zbylých vzorcích byly prováděny experimenty, které jsou popsány níže. Tyto vzorky byly skladovány v běžných pokojových podmínkách v krytém prostředí.

V této kapitole je provedeno srovnání změn mechanických charakteristik nevyužitých sendvičů po 15- ti letech uskladnění. Dále zde bude zkoumán dodatečný vliv vlhkého tepla a solné atmosféry na vlastnosti těchto sendvičů.

Jako první je uvedena metodika zkoušky a výsledky z měření v roce 2001, v další části kapitoly je uvedena metodika a výsledky zkoušky po 15 – ti letech stárnutí.

2.1 SPECIFIKACE ZKOUŠENÝCH SENDVIČŮ

Typ voštiny: 3.080, 4.060, 6.040, 8.030

Materiál voštiny: Al 99,5 – ČSN 42 4005, fólie tloušťka 0,06mm

Potah: materiál ČSN 42 4201.61, tloušťka 1 mm

Lepidlo: LETOXIT KFL 120 (jednosložkové epoxidové fóliové lepidlo) + LETOXIT PFL 120 (roztok epoxidové pryskyřice pro úpravu povrchu)

Výroba: podle běžných postupů 5M, s.r.o., výroba ve vytvrzovací peci při 120 °C

2.2 VÝSLEDKY V ROCE 2001

Experimentální určení mechanických charakteristik hliníkových sendvičových desek vyráběných firmou 5M, s.r.o. provedených v roce 2001.

2.2.1 METODIKA ZKOUŠEK

Pevnost v tlaku

Použité postupy jsou v souladu s ASTM C 365. Rozměry vzorků jsou 75 x 75 mm, tloušťka vzorků včetně potahových plechů je 18 mm. Zatěžovací rychlost $v = 5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Zkouška dovoluje stanovit mez pevnosti v tlaku R_d a modul pružnosti v tlaku v lineární části zatěžovací křivky. Při určení modulu pružnosti je nutné dodržet rovinnost a rovnoběžnost potahů sendviče v toleranci 0,085 mm, při nedodržení dochází k velkému rozptylu výsledků. Při určování pevnosti v tlaku nemají tyto zásady až tak výrazný vliv, nicméně i přesto jejich nedodržení může vést k nižším hodnotám pevnosti v tlaku. Zkoušky byly provedeny na vzorcích, bez rozměrové kontroly a ze statistického hodnocení byly vyřazeny vzorky poškozené nebo vzorky, které se zjevně vymykaly z daného souboru. [23]

Pevnost v tlaku určena ze vztahu [23]:

$$R_d = \frac{F_{max}}{S} \quad [MPa]$$

Kde F_{\max} – maximální zatěžovací síla [N]

S – plocha průřezu vzorku (75 x 75 mm) [mm²]

Modul pružnosti ve smyku

Modul pružnosti ve smyku pro podélnou a příčnou orientaci voštinového jádra je určen ohybovou zkouškou dle ASTM C 393–95. V případě tříbodového ohybu byly použity vzorky délky 200 mm a šířky 75 mm, tloušťka včetně potahů byla 18 mm. Vzdálenost podpor 150 mm. Vzorky byly zatěžovány pouze v pružné oblasti se záznamem závislosti – síla průhyb. Průhyb vzorku byl měřen digitálním úchylkoměrem s přesností 0,003 mm mezi dvěma hodnotami zatížení do 30 % síly při porušení vzorku. Rychlost zatěžování byla volena tak, aby docházelo k poruše během 3–6 minut. Každé měření bylo třikrát opakováno, aby byly chyby měření maximálně eliminovány. Uvedená norma nespécifikuje požadavky na geometrickou přesnost vzorků. Ze zkoušení byly vyřazeny vzorky pouze zjevně poškozené. V případě mnoha vzorků byly zjištěny značné úchyly rovinnosti, což se mohlo projevit nižšími hodnotami, případně větším rozptylem hodnot smykového modulu. [23]

Pro výpočet modulu pružnosti ve smyku byl použit vztah podle Hexcel Composites pro celkový průhyb nosníku [23]:

$$\Delta = \frac{k_b FL^3}{D} + \frac{k_s FL}{hG_s b} \quad [mm]$$

$$D = \frac{E t h^2 b}{2\lambda} \quad [N \cdot m^2]$$

Konečný vztah pro výpočet modulu pružnosti ve smyku G_s [23]:

$$G_s = \frac{k_s FL}{hb \left(\Delta - \frac{k_b FL^3}{D} \right)} \quad [MPa]$$

kde F – síla [N]

L – vzdálenost podpor [mm]

k_b – průhybový součinitel od ohybu

k_s – průhybový součinitel od smyku

D – součinitel tuhosti nosníku s potahy stejné tloušťky a stejného modulu pružnosti

$h = c + t$ [mm]

c – tloušťka jádra [mm]

t – tloušťka potahu [mm]

b – šířka vzorku [mm]

E – modul pružnosti v tahu materiálu potahu [MPa]

$\lambda = 1 - \mu^2$

G_s – modul pružnosti ve smyku jádra [MPa]

Pro výpočet G_s byly použity následující hodnoty:

$$k_b = 0,02083$$

$$k_s = 0,25$$

$$c = 16 \text{ mm}$$

$$t = 1 \text{ mm}$$

$$b = 75 \text{ mm}$$

$$E = 72\,000 \text{ MPa}$$

$$\mu = 0,33$$

2.2.2 VÝSLEDKY

Výsledky z měření pro jednotlivé typy voštiny jsou zapsány v tabulkách 4 a 5.

Tab. 4 Pevnost v tlaku [23]

typ voštiny	R_d [MPa]	σ_{n-1}
3.080	$\frac{3.360}{4.564 - 2.713}$ (30)	0,414
4.060	$\frac{2.159}{2.526 - 1.730}$ (37)	0,214
6.040	$\frac{1.091}{1.468 - 0.750}$ (30)	0,194
8.030	$\frac{0.689}{0.846 - 0.516}$ (30)	0,088
<p>Pevnost v tlaku je ve tvaru zlomku, kde čítec určuje střední hodnotu, ve jmenovateli je uvedena maximální a minimální hodnota zjištěná u daného souboru vzorků. V závorce je počet vzorků v souboru.</p>		

Tab. 5 Modul pružnosti ve smyku zjištěný ohybovou zkouškou [23]

typ voštiny	napříč fólie		podél fólie	
	G_s [MPa]	σ_{n-1}	G_s [MPa]	σ_{n-1}
3.080	$\frac{185.0}{237.0 - 130.6}$ (30)	29,6	$\frac{396.7}{489.8 - 333.2}$ (29)	40,0
4.060	$\frac{143.7}{169.0 - 94.5}$ (30)	18,5	$\frac{250.6}{313.4 - 149.1}$ (30)	42,5
6.040	$\frac{87.7}{116.0 - 58.1}$ (29)	13,6	$\frac{166.2}{230.6 - 112.4}$ (34)	29,3
8.030	$\frac{62.1}{85.5 - 49.2}$ (23)	10,6	$\frac{151.4}{185.1 - 129.1}$ (22)	16,0

Modul pružnosti ve smyku je ve tvaru zlomku, kde čítec určuje střední hodnotu, ve jmenovateli je uvedena maximální a minimální hodnota zjištěná u daného souboru vzorků. V závorce je počet vzorků v souboru.

Z přiložené tabulky je zřejmý velký rozptyl hodnot, který je mimo materiálových a technologických faktorů ovlivněn hlavně kroucením vzorků při jejich obrábění. Při ohybové zkoušce připadá část měřeného průhybu na vyrovnání zmíněného kroucení a vypočtený modul je tak menší, než odpovídá skutečnosti. [23]

2.3 VÝSLEDKY PO 15 -TI LETECH

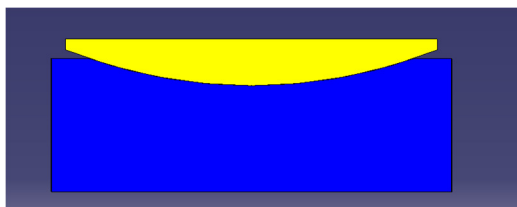
Zkoušení se zakládá na úvaze o vlivu prostředí na lepidlo, jeho stárnutí. Tento vliv může být výrazný, protože v konstrukci je významně použito lepidlo, jak na přilepení potahů k jádru, tak na vytvoření voštinového jádra, které se skládá ze vzájemně slepených Al pásků.

2.3.1 METODIKA ZKOUŠEK TLAKOVÉ PEVNOSTI

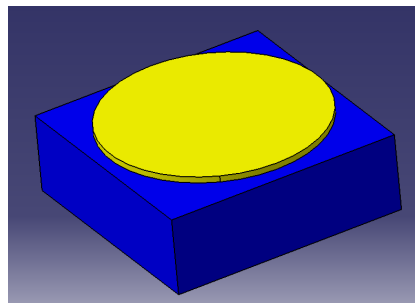
Pevnost v tlaku

Pro porovnání výsledků bylo velmi důležité, aby byly vzorky zkoušeny při maximální možné shodnosti podmínek jako před 15 -ti lety. Podstata zkoušení je popsána u zkoušení vzorků před 15 -ti lety. Byla snaha tyto podmínky co nejvíce dodržet. Zkoušení probíhalo na stroji ZDM 10/91–2214/36–1967 Rauenstein. Použité postupy jsou v souladu s ASTM C 365. Rozměry vzorků jsou 75 x 75 mm, tloušťka vzorků včetně potahových plechů je 18 mm. Zatěžovací rychlost je minimální, jež stroj umožňuje a to $v = 5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Zkouška dovoluje stanovit mez pevnosti v tlaku R_d .

Obrázky 21 a 22 zobrazují vyrovnávací desku při tlakové zkoušce. Norma pro zkoušení sendvičových konstrukcí v tlaku sice nestanovuje rovnoběžnost potahů, ale v tomto případě bylo velmi důsledně využito tohoto přípravku na přesné srovnání horní a dolní plochy sendviče mezi tlačné desky.



Obr. 21 Schema vyrovnání v řezu



Obr. 22 Schema vyrovnání při zkoušce

2.3.2 VÝSLEDKY TLAKOVÉ PEVNOSTI PO 15 -TI LETECH

Tlaková pevnost

Naměřené hodnoty vzorků u voštiny 8.030 jsou následující.

Pevnost v tlaku určena ze vztahu [23]:

$$R_d = \frac{F_{max}}{S} \quad [MPa]$$

Kde F_{max} – maximální zatěžovací síla [N]

S – plocha průřezu vzorku (75 x 75 mm) [mm²]

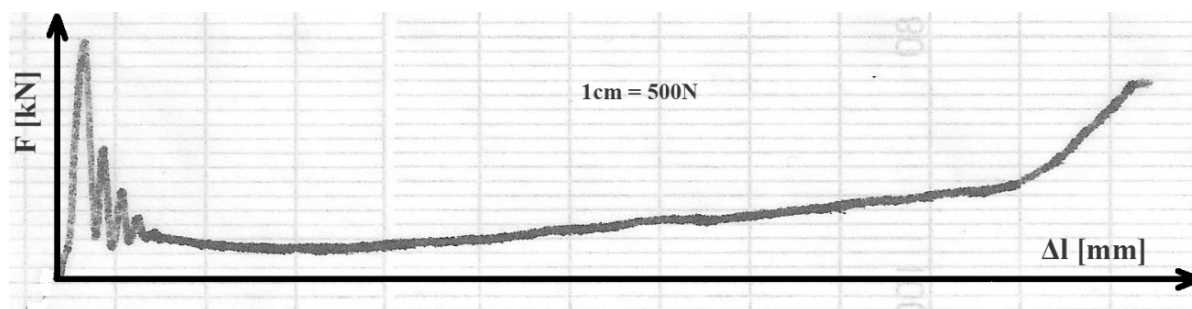
Příklad výpočtu pro první řádek:

$$R_d = \frac{2780}{75 \cdot 75} = 0,494 \text{ MPa}$$

Tab. 6 Maximální pevnosti vzorků voštiny 8.030

Označení vzorku	R_d [MPa]
1	0.494
2	0.56
3	0.897
4	0.987
5	0.629
6	0.702
\bar{x}	0.7117
σ	0.1767
s^2	0.031236
MAX	0.987
MIN	0.494

Viditelné rozkmitání na obr. 23 je způsobeno rychlým poklesem zatěžovací síly a setrvačností mechanického zapisovače. Mimo tuto anomálii je ze záznamu patrný typický průběh tlakové zkoušky sendvičového panelu. Narůstající síla až do maxima, následný pokles až k minimální hodnotě a opět pozvolný nárůst síly, až do okamžiku, kdy začíná síla prudce růst, což je způsobeno limitním napěchováním voštinového jádra mezi potahy.



Obr. 23 Záznam tlakové zkoušky voštiny 8.030

Naměřené a vypočtené výsledky dalších typů voštin jsou uvedeny v příloze P-I.

Shrnutí výsledků

Tab. 7 Výsledky po tlakové zkoušce

Výsledky po 15-ti letech				
Typ voštiny	R_d [MPa]	σ_{n-1}	s^2	n
3.080	3.775	0.677	0.4587	6
4.060	2.231	0.454	0.2065	6
6.040	1.150	0.172	0.0297	6
8.030	0.712	0.177	0.0312	6

Původní výsledky jsou zde znovu uváděny jen pro rychlé vizuální porovnání s výsledky novými.

Tab. 8 Původní výsledky

Původní výsledky				
Typ voštiny	R_d [MPa]	σ_{n-1}	s^2	n
3.080	3.360	0.414	0.1714	30
4.060	2.159	0.214	0.0458	37
6.040	1.091	0.194	0.0376	30
8.030	0.689	0.088	0.0077	30

2.3.3 VALIDACE DAT TLAKOVÉ PEVNOSTI

Postup při dvouvýběrovém t-testu:

1. Zformulovat hypotézy H_0 a H_1
2. Stanovit hodnotu α
3. Zvolit adekvátní testové kritérium a stanovit hodnotu testového kritéria
4. Zjistit, zda $t \in \kappa$
5. Závěr [12]

Nejdříve je nutné stanovit si otázku, na kterou se ptáme. V našem případě otázka zní: Je pevnost v tlaku naměřená před 15 -ti lety a nyní stejná? Ověřením této otázky ověříme skutečnost, zda se v pevnosti v tlaku projevil vliv stárnutí.

První budeme testovat, zda $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$, což je test hypotéz o parametrech σ^2_1 a σ^2_2 dvou normálních rozdělení. Z této hypotézy zjistíme, zda se zamítá či nezamítá a na základě výsledku se rozhodneme, zda v následujícím testování budeme postupovat dle $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$ nebo $\sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$. Toto určení je důležité, neboť postupy výpočtu se značně liší. Test hypotéz o parametrech μ_1 a μ_2 dvou normálních rozdělení nám pomůže rozhodnout, zda jsou střední hodnoty obou souborů významně či nevýznamně odlišné.

Testy hypotéz o parametrech σ^2_1 a σ^2_2 dvou normálních rozdělení

U základního souboru s rozdělením $N(\mu_1, \sigma_1)$, provedeme náhodný výběr n_1 , z něhož určíme výběrový rozptyl s^2_1 . Totéž se opakuje u druhého rozdělení $N(\mu_2, \sigma_2)$ s náhodným výběrem n_2 , z něhož určíme výběrový rozptyl s^2_2 . Rozsah výběru, z něhož byl vypočten větší z výběrových rozptylů, označíme n' , rozsah výběru, z něhož byl vypočten menší z výběrových rozptylů, označíme n'' . [12]

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, pro tento případ platí: [12]

H_0	H_1	Testová charakteristika	Kritický obor
$\sigma^2_1 = \sigma^2_2$	$\sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$	$F_3 = \frac{\max(s^2_1, s^2_2)}{\min(s^2_1, s^2_2)}$	$F_3 > F_{\alpha/2}(n' - 1, n'' - 1)$

Obsahem hypotéz jsou tvrzení o vzájemném vztahu mezi neznámými parametry σ^2_1 a σ^2_2 obou rozdělení. Dvojice hypotéz, testové charakteristiky a dané kritické obory testů na hladině významnosti α jsou uvedeny v příloze P-III tab. B. [12]

Příklad výpočtu pro výsledek voštiny 3.080:

$$F_3 = \frac{0,4587}{0,1714} = 2,676$$

Test na hladině významnosti $\alpha = 0,1$ při použití tabulky v příloze P-III tab. B (stupně volnosti se mění podle velikosti rozptylu, soubor s větším rozptylem je první).

$$F_{\frac{\alpha}{2}}(6 - 1, 30 - 1) \rightarrow F_{\frac{\alpha}{2}}(5, 29) = 2,54$$

$$F_3 > F_{\frac{\alpha}{2}} \rightarrow 2,676 > 2,54$$

Hypotézu zamítáme na hladině významnosti $\alpha = 0,1$. Nyní víme, že $\sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$ a můžeme pokračovat v dalším ověření následující hypotézou, zda $\mu_1 = \mu_2$.

Testy hypotéz o parametrech μ_1 a μ_2 dvou normálních rozdělení

U prvního rozdělení $N(\mu_1, \sigma_1)$, provedeme náhodný výběr n_1 , z něhož určíme \bar{x}_1 a rozptyl s^2_1 . Totéž se opakuje u druhého rozdělení $N(\mu_2, \sigma_2)$ s náhodným výběrem n_2 , z něhož určíme \bar{x}_2 a rozptyl s^2_2 . Hypotéza se týká vztahu neznámých středních hodnot μ_1 a μ_2 . Je nutno však rozlišovat dva případy, při kterých se test provádí odlišně, a to vzhledem k tomu, zda se rozptyly σ^2_1, σ^2_2 sobě rovnají, či ne. [12]

V případě, že $\sigma^2_1 = \sigma^2_2 = \sigma^2$, volíme za testovou charakteristiku: [12]

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}}$$

$$s = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s^2_1 + (n_2 - 1)s^2_2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, pro náš případ platí: [12]

H_0	H_1	Kritický obor
$\mu_1 = \mu_2$	$\mu_1 \neq \mu_2$	$|t| = t_{\alpha}(n_1 + n_2 - 2)$

V případě, že $\sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$, volíme za testovou charakteristiku: [12]

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\left(\frac{s^2_1}{n_1} + \frac{s^2_2}{n_2}\right)}}$$

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou rovněž dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, v našem případě $\mu_1 = \mu_2$, v tomto případě se ale počet stupňů volnosti určí ze vzorce: [12]

$$v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}}$$

Pokračování ukázkového výpočtu výsledků voštiny 3.080:

$$|t| = \frac{3,775 - 3,360}{\sqrt{\left(\frac{0,1714^2}{30} + \frac{0,4587^2}{6}\right)}} = 1,447$$

$$v = \frac{\left(\frac{0,4587^2}{6} + \frac{0,1714^2}{30}\right)^2}{\frac{\left(\frac{0,4587^2}{6}\right)^2}{6 - 1} + \frac{\left(\frac{0,1714^2}{30}\right)^2}{30 - 1}} = 5,76$$

Z tabulky v příloze P-III obr. A zjistíme hodnotu pro $t_{0,05}(5,76) = 2,446$.

$$|t| = 1,447 < t_{0,05} = 2,446$$

Hypotézu nezamítáme. Tudíž připouštíme na hladině pravděpodobnosti $\alpha = 0,1$, že tlaková pevnost voštiny 3.080 je stejná jako před 15 -ti lety.

Výsledky hypotéz při ověřování, zda $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$, (tab.10).

Tab. 9 Výsledky hypotézy $\sigma_1^2 = \sigma_2^2$

Typ voštiny	Kritický obor	Testová charakteristika	Stav hypotézy
	$F_{\alpha/2}$	F_3	
3.080	2.54	2.6765	Hypotézu zamítáme
4.060	2.48	4.5089	Hypotézu zamítáme
6.040	4.51	1.2682	Hypotézu nezamítáme
8.030	2.54	4.0336	Hypotézu zamítáme

Na základě těchto výsledků přistoupíme k ověření další hypotézy zda, $\mu_1 = \mu_2$ (tab.11,12).

Tab. 10 Výsledky hypotézy $\mu_1 = \mu_2$

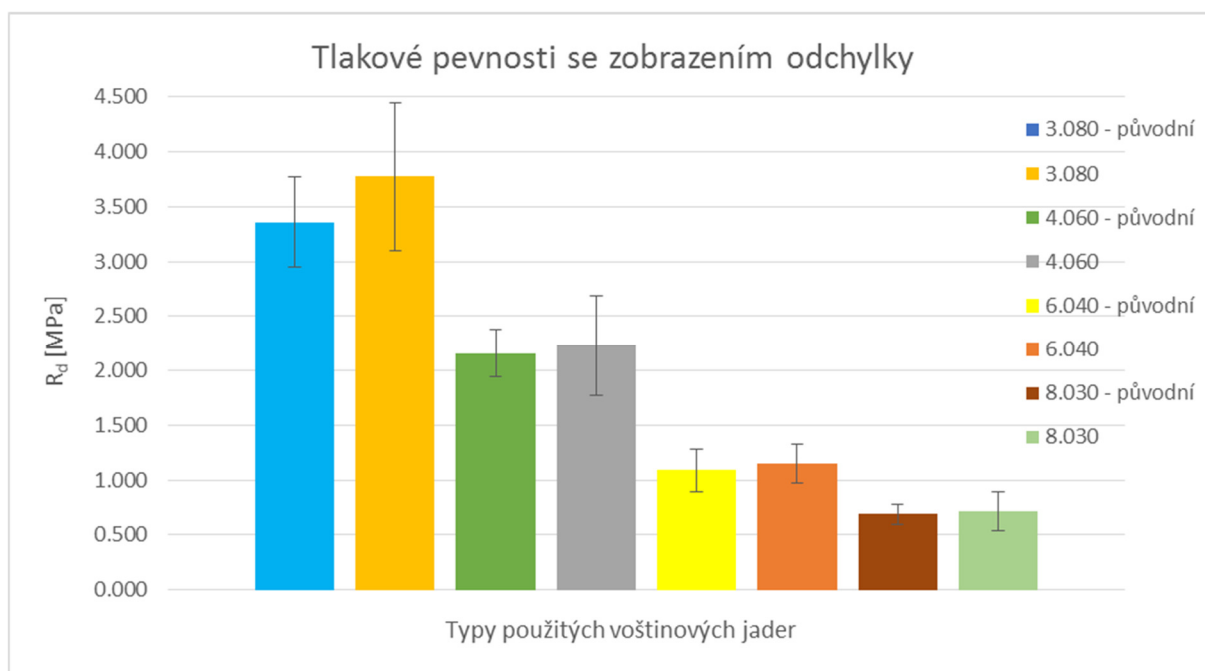
Typ voštiny	s	Testová charakteristika	Kritická hodnota	Stav hypotézy
		t	$t_{0.05}$	
6.040	0.1910	0.6865	2.0312	Hypotézu nezamítáme - soubory jsou totožné

Tab. 11 Výsledky hypotézy $\mu_1 = \mu_2$ pokračování

Typ voštiny	Testová charakteristika	Počet stupňů volnosti	Kritická hodnota	Stav hypotézy
	t	v	$t_{0.05}$	
3.080	1.4471	5.7696	2.44	Hypotézu nezamítáme - soubory jsou totožné
4.060	0.3803	5.3652	2.57	Hypotézu nezamítáme - soubory jsou totožné
8.030	0.3071	5.5058	2.44	Hypotézu nezamítáme - soubory jsou totožné

Na základě výsledků z tab. 10 a 11 můžeme usuzovat, zda došlo po 15 -ti letech ke změně mechanických vlastností zjištěných tlakovou zkouškou.

Na začátku testů byla položena otázka: Je pevnost v tlaku naměřená před 15 -ti lety a nyní stejná? Na základě provedených hypotéz lze konstatovat, že pevnost měřená před 15 -ti lety a nyní není rozdílná.



Obr. 24 Graf středních hodnot tlakové pevnosti s odchylkami po 15 -ti letech stárnutí

Rozptyly naměřených hodnot jsou všeobecně dosti velké. Toto je způsobeno mnoha vlivy, jako jsou: výrobní rozptyl rozměrů voštiny, nerovnosti povrchu potahů, přesné vyrovnání zkoušeného vzorku mezi tlačné desky, kvalita vzorku ovlivněná řezáním (rohů vzorků ohnuté). Kvalitou řezu byly ovlivněny i voštiny. Bylo zřetelně vidět, že některé vzorky v rozích a po okrajích měly menší podíl voštinového jádra, tento jev je nejvíce patrný u velkých buněk. Další podstatný vliv je počet zkoušených vzorků. V tomto případě zkoušení bylo limitováno počtem vzorků, zcela určitě je vhodnější pro statistické zpracování mít více naměřených dat. V případě tlakové zkoušky se dá konstatovat, že výrobní nepřesnosti (úchytky) překrývají mnohem více stárnutí. Na několika vzorcích je viditelné posunutí potahů proti sobě, to samozřejmě není příznivý jev, ale je též nutno uvážit, že voštinové jádro je ve směru lepení mnohem tužší než ve směru druhém. Pokud tedy dochází k velkému zatěžování a deformaci materiál má snahu posouvat se ve směru nejmenšího odporu.

Tuto skutečnost též můžeme podpořit následujícím grafem. Obrázek 24 zobrazuje střední hodnoty tlakové pevnosti původních a nových vzorků. Díky zakresleným odchylkám je z grafu patrné, že se původní a nové hodnoty překrývají, což je potvrzeno i statistickou analýzou.

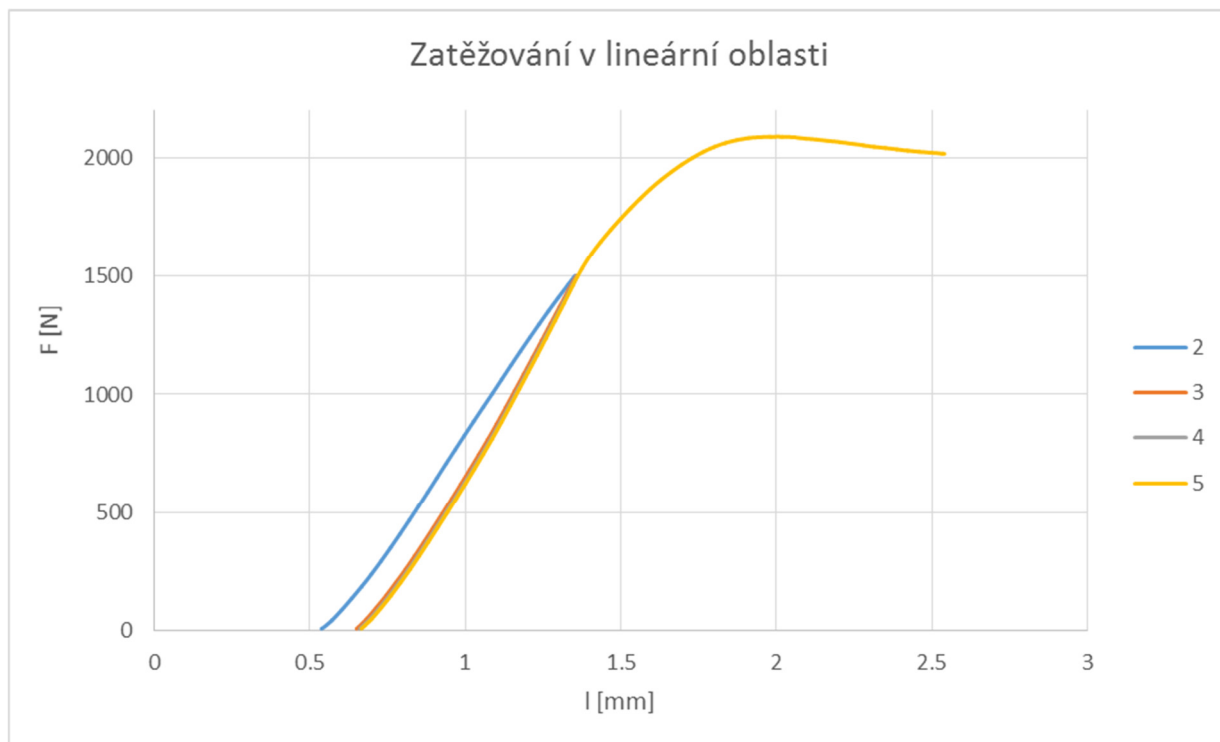
Fotografie všech vzorků po zkoušce mohou být nalezeny v příloze P-II.

2.3.4 METODIKA ZKOUŠEK MODULU PRUŽNOSTI VE SMYKU

Stejně jako v případě měření tlakové pevnosti je snaha co nejvíce dodržet podobnost postupu měření. Modul pružnosti byl stanoven pomocí třibodové ohybové zkoušky. Kdy délka vzorku byla 200 mm a šířka 75 mm. Při měření tloušťky vzorku byla zjištěna její velká odchylka. Každý vzorek byl několikrát změřen a data poté zprůměrována na střední hodnotu. Zkouška probíhala na stroji se záznamem hodnot síla – posun (průhyb).

Rychlost posuvu byla nastavena tak, že k poruše vzorku docházelo během 2–3 min. Na základě obr. 25 můžeme rozhodnout o opakovatelnosti zatěžování v lineární oblasti. Modrá křivka s pracovním označením 2 zachycuje vyrovnání deformací a výrobních nepřesností vzorku, po tomto vyrovnání byl vzorek 3x odlehčen a opět zatížen. Tyto křivky se v největší možné míře překrývají viz. obr.25. Bylo rozhodnuto, že opakované zatěžování pro vyloučení nepřesností není třeba.

Norma ASTM 393 – 00 specifikuje základní rozměry zkoušeného panelu, a to vzdálenost podpěr k tloušťce sendviče $L/d > 20$, tloušťku potahu k tloušťce jádra $t/c < 0.1$, nicméně tyto doporučení se vztahují pro čtyřbodový ohyb a nemusí být striktně dodrženy. Šířka zkoušeného vzorku by neměla být méně než dvojnásobek celkové tloušťky, taktéž by neměla být menší než trojnásobek rozměru voštinové buňky, ale neměla by být ani větší než polovina vzdálenosti podpěr. Celková délka vzorku by měla být vzdálenost podpěr plus 50 mm nebo polovina tloušťky sendviče. Záleží, co je v tomto případě větší. [14]



Obr. 25 Graf pro posouzení opakovaného zatížení

Pro výpočet modulu pružnosti byl použit následující postup: na jednotlivých křivkách daného (stejného) souboru byly zvoleny stejné body. Danému rozdílu sil odpovídá určité Δl (posunutí). Posunutí Δ ve vzorci (2.3) odpovídá hodnota Δl a ΔF dosazeno za F . Vyjádřením G_s je určen modul pružnosti ve smyku.

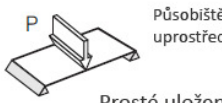
2.3.5 VÝSLEDKY MODULU PRUŽNOSTI VE SMYKU PO 15 -TI LETECH

V této kapitole jsou porovnána měření po 15 -ti letech s měřeními původními. Uvedeny jsou zde vzorce pro výpočet dle ASTM 393–00 i pro výpočet dle Hexcel Composites. Hlavní zaměření je provedeno na výpočet dle Hexcel Composites, protože původní data jsou zpracována právě podle tohoto postupu.

Následující uvedené rovnice jsou v souladu s Hexcel Composites.

Hodnoty součinitelů k_s a k_b určeny z tabulky 13 Hexcel Composites:

 Tab. 12 Tabulka koeficientů k_s a k_b [13]

Druh uložení	Maximální smyková síla F	Maximální ohybový moment M	Ohybový koeficient k_b	Smykový koeficient k_s
	$\frac{P}{2}$	$\frac{Pl}{4}$	$\frac{1}{48}$	$\frac{1}{4}$

F – síla [N]

L – vzdálenost podpor [mm]

k_b – průhybový součinitel od ohybu

k_s – průhybový součinitel od smyku

D – součinitel tuhosti nosníku s potahy stejné tloušťky a stejného modulu pružnosti

$h = c + t$ [mm] – tloušťka sendviče Hexcel Composites

c – tloušťka jádra [mm]

t – tloušťka potahu [mm]

b – šířka vzorku [mm]

E – modul pružnosti v tahu materiálu potahu [MPa]

d – výška sendviče ASTM 393-00 ($d = c + 2t$) [mm]

$\lambda = 1 - \mu^2$

G_s – modul pružnosti ve smyku jádra [MPa]

Smykové napětí v jádru: [13]

$$\tau = \frac{F}{2hb} \quad [MPa] \quad (2.1)$$

Napětí v potahu sendvičového panelu: [13]

$$\sigma = \frac{FL}{4htb} \quad [MPa] \quad (2.2)$$

$h = c + t$

Průhyb sendvičového panelu: [13]

$$\Delta = \frac{k_b FL^3}{D} + \frac{k_s FL}{hG_s b} \quad [mm] \quad (2.3)$$

Ohybová tuhost panelu: [13]

$$D = \frac{Eth^2b}{2\lambda} \quad [N \cdot mm^2] \quad (2.4)$$

Následující uvedené rovnice jsou v souladu s normou ASTM 393–00.

Smykové napětí v jádru: [14]

$$\tau = \frac{P}{(d + c)b} \quad [MPa] \quad (2.5)$$

Napětí v potahu sendvičového panelu: [14]

$$\sigma = \frac{PL}{2t(d+c)b} \quad [MPa] \quad (2.6)$$

Průhyb sendvičového panelu: [14]

$$\Delta = \frac{PL^3}{48D} + \frac{PL}{4U} \quad [mm] \quad (2.7)$$

celkový průhyb = ohybová složka + smyková složka

, kde

Ohybová tuhost panelu: [14]

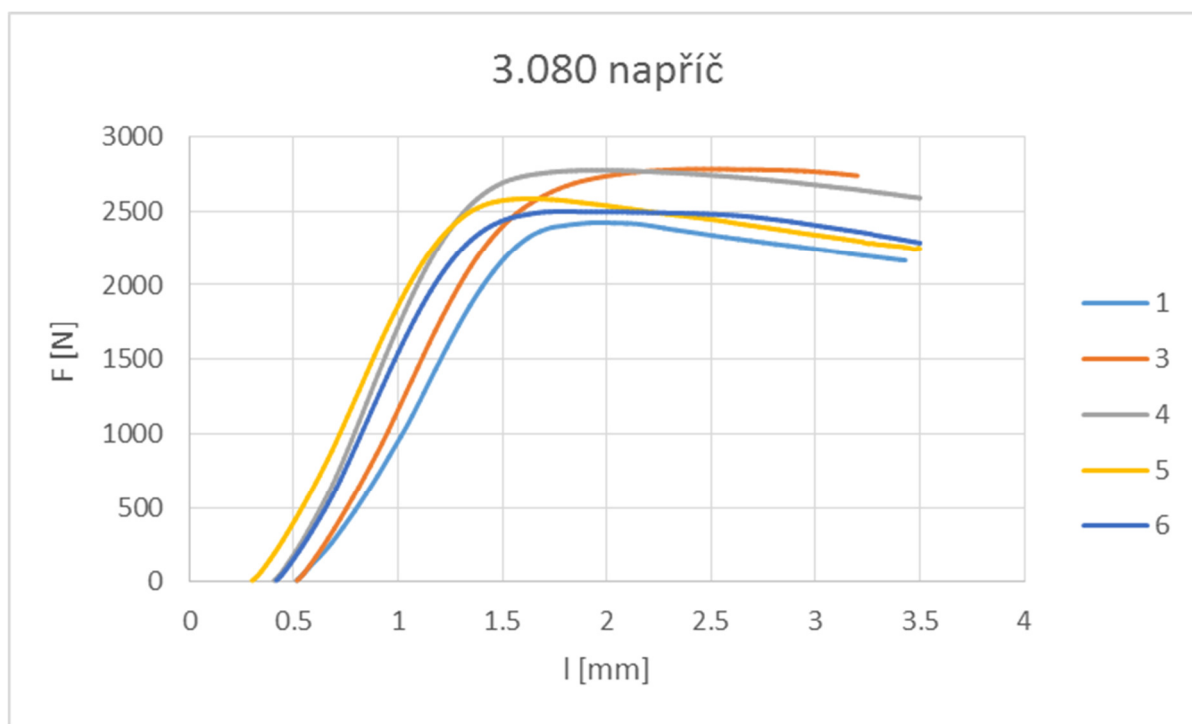
$$D = \frac{E(d^3 - c^3)b}{12} \quad [N \cdot mm^2] \quad (2.8)$$

Smyková tuhost panelu: [14]

$$U = \frac{G(d+c)^2b}{4c} \quad [N] \quad (2.9)$$

Uvedené rovnice mohou být použity za předpokladu panelu zatěžovaného uprostřed a panelu opatřeného na obou stranách potahem ze stejného materiálu. Vzorce Hexcel Composites a ASTM 393-00 jsou po úpravách totožné.

Mechanické vlastnosti sendvičového panelu s typem voštiny 3.080 – napříč



Obr. 26 Graf zkoušky v ohybu voštiny 3.080 napříč

Zde je pro názornost uveden graf (obr.27) zobrazující zatěžování. Průběhy dalších typů voštin jsou uvedeny v příloze P-IV. Vzorek číslo 2 byl z porovnání vyřazen, maximální hodnota síly se vymykala všem ostatním naměřeným. Při přezkoumání bylo zřetelné, že vzorek byl již v počátku zkoušky porušený.

Tab. 13 Smyková napětí v jádru dle HC

Smyková napětí v jádru dle Hexcel Composites		
Typ voštiny	vzorek	τ [MPa]
3.080 - napříč	1	0.95
	3	1.09
	4	1.08
	5	1.01
	6	0.97

Tab. 14 Napětí v potahu dle HC

Napětí potahu sendvičového panelu dle Hexcel Composites		
Typ voštiny	vzorek	σ [MPa]
3.080 - napříč	1	71.1
	3	81.6
	4	81.1
	5	75.5
	6	73.1

Hodnoty v tabulce 13 vypočteny dle rovnice (2.1), v tabulce 14 dle rovnice (2.2).

Výpočet maximální ohybové pevnosti dle:

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} = \frac{F_{max}L}{\frac{4bh^3}{6}} \quad [MPa] \quad (2.10)$$

Tab. 15 Maximální síly

Maximální síly		
Typ voštiny	vzorek	F_{max} [N]
3.080 - napříč	1	2423.5
	3	2783.3
	4	2776
	5	2585.1
	6	2498.9

Tab. 16 Ohybové pevnosti sendviče

Maximálních ohybové pevnosti		
Typ voštiny	vzorek	σ_{max} [MPa]
3.080 - napříč	1	22.3
	3	25.6
	4	25.4
	5	23.6
	6	22.9

Maximální síly odečteny z dat zkoušky.

Hodnoty v tabulce 15 vypočteny dle rovnice (2.10).

Tab. 17 Modul pružnosti ve smyku dle Hexcel Composites

Modul pružnosti ve smyku dle Hexcel Composites		
Typ voštiny	vzorek	G_s [MPa]
3.080 - napříč	1	104.1
	3	117.7
	4	143.2
	5	125.3
	6	122.7

Hodnoty v tabulce 17 vypočteny dle rovnice (2.3).

Uvedení vypočtených výsledků pro všechny druhy voštinových jader.

Tab. 18 Tabulka výpočtů původního modulu pružnosti ve smyku

Původní výsledky								
Statistické veličiny	3.080		4.060		6.040		8.030	
	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél
$\bar{x} - G_s$ [MPa]	185.0	396.7	143.7	250.6	87.7	166.2	62.1	151.4
σ [MPa]	29.6	40.0	18.5	42.5	13.6	29.3	10.6	16.0
s^2 [MPa ²]	876.2	1600.0	342.3	1806.3	185.0	858.5	112.4	256.0
MAX [MPa]	237.0	489.8	169.0	313.4	116.0	230.6	85.5	185.1
MIN [MPa]	130.6	333.2	94.5	149.1	58.1	112.4	49.2	129.1
n [-]	30	29	30	30	29	34	23	22

Tab. 19 Tabulka výpočtů modulu pružnosti ve smyku po 15 -ti letech

Výsledky po 15 - ti letech								
Statistické veličiny	3.080		4.060		6.040		8.030	
	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél
$\bar{x} - G_s$ [MPa]	122.6	233.4	102.2	160.1	48.7	105.6	32.1	77.9
σ [MPa]	12.6	6.7	9.9	14.8	4.3	13.8	1.7	7.4
s^2 [MPa ²]	159.4	44.5	98.9	218.0	18.2	191.5	3.0	55.4
MAX [MPa]	143.2	242.7	113.6	181.9	55.1	123.2	34.4	86.4
MIN [MPa]	104.1	224.8	88.6	141.9	44.2	91.5	29.7	65.8
n [-]	5	5	5	5	5	5	4	5

2.3.6 VALIDACE DAT MODULU PRUŽNOSTI VE SMYKU

Byl proveden naprosto stejný postup validace jako u hodnot týkajících se tlakové pevnosti. Ptáme se na tutéž otázku: Je modul pružnosti ve smyku naměřený před 15 -ti lety a nyní stejný?

Testy hypotéz o parametrech σ^2_1 a σ^2_2 dvou normálních rozdělení

Stanovení první hypotézy.

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, pro náš případ platí: [12]

H_0	H_1	Testová charakteristika	Kritický obor
$\sigma^2_1 = \sigma^2_2$	$\sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$	$F_3 = \frac{\max(s_1^2, s_2^2)}{\min(s_1^2, s_2^2)}$	$F_3 > F_{\alpha/2}(n' - 1, n'' - 1)$

Testy hypotéz o parametrech μ_1 a μ_2 dvou normálních rozdělení

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, pro náš případ platí: [12]

H_0	H_1	Kritický obor
$\mu_1 = \mu_2$	$\mu_1 \neq \mu_2$	$|t| = t_{\alpha}(n_1 + n_2 - 2)$

Výsledky hypotéz při ověřování, zda $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$. (tab.24)

Tab. 20 Tabulka výsledků hypotézy $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$

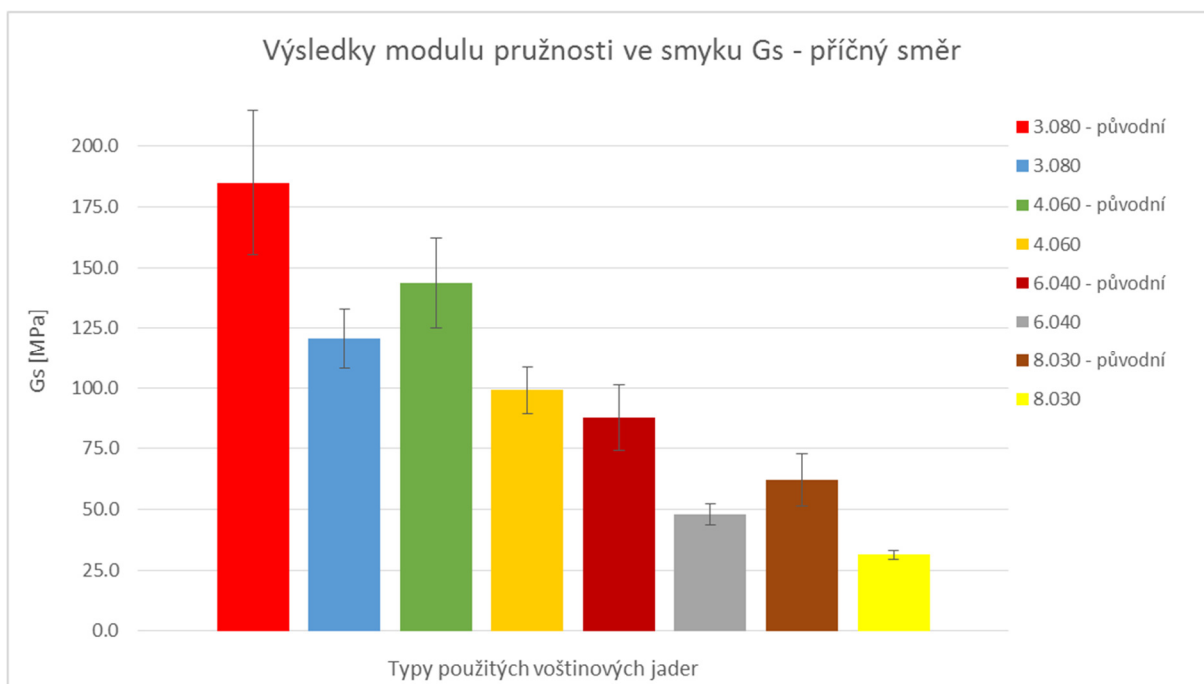
Statistické veličiny	3.080		4.060		6.040		8.030	
	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél
Kritický obor $F_{\alpha}/2$	5.750	5.755	5.750	5.750	5.755	5.730	8.660	5.790
Testová charakteristika F_3	5.50	35.97	3.46	8.29	10.19	4.48	37.94	4.62
Stav hypotézy	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu zamítáme	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu zamítáme	Hypotézu zamítáme	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu zamítáme	Hypotézu nezamítáme

Na základě těchto výsledků přistoupíme k ověření další hypotézy, zda $\mu_1 = \mu_2$. (tab.25)

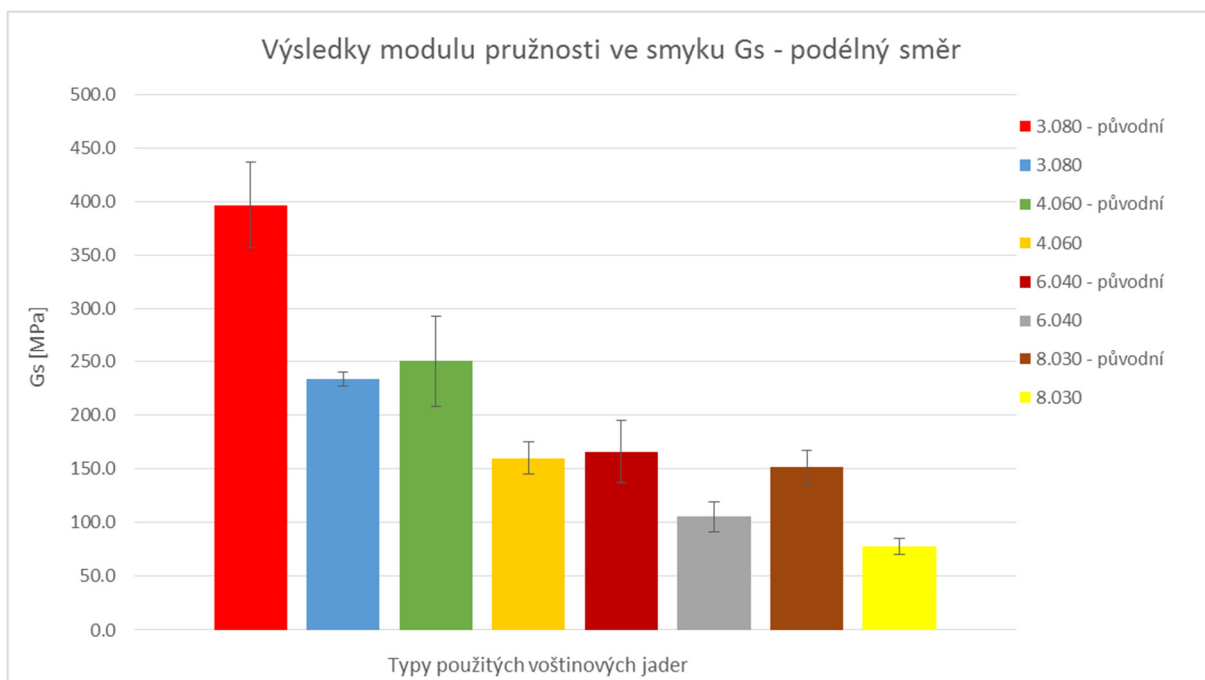
Tab. 21 Výsledky hypotézy $\mu_1 = \mu_2$

Statistické veličiny	3.080		4.060		6.040		8.030	
	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél
Testová charakteristika t	4.597	20.399	4.863	8.880	12.334	4.510	12.663	9.917
Počet stupňů volnosti v, s	28.09	31.94	17.68	17.95	21.09	28.04	24.97	14.96
Kritická hodnota $t_{0.05}$	2.048	2.041	2.1	2.1	2.079	2.048	2.059	2.131
Stav hypotézy	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné

Obrázky 28 a 29 zachycují srovnání původních hodnot modulu pružnosti ve smyku a hodnot naměřených po 15 -ti letech.



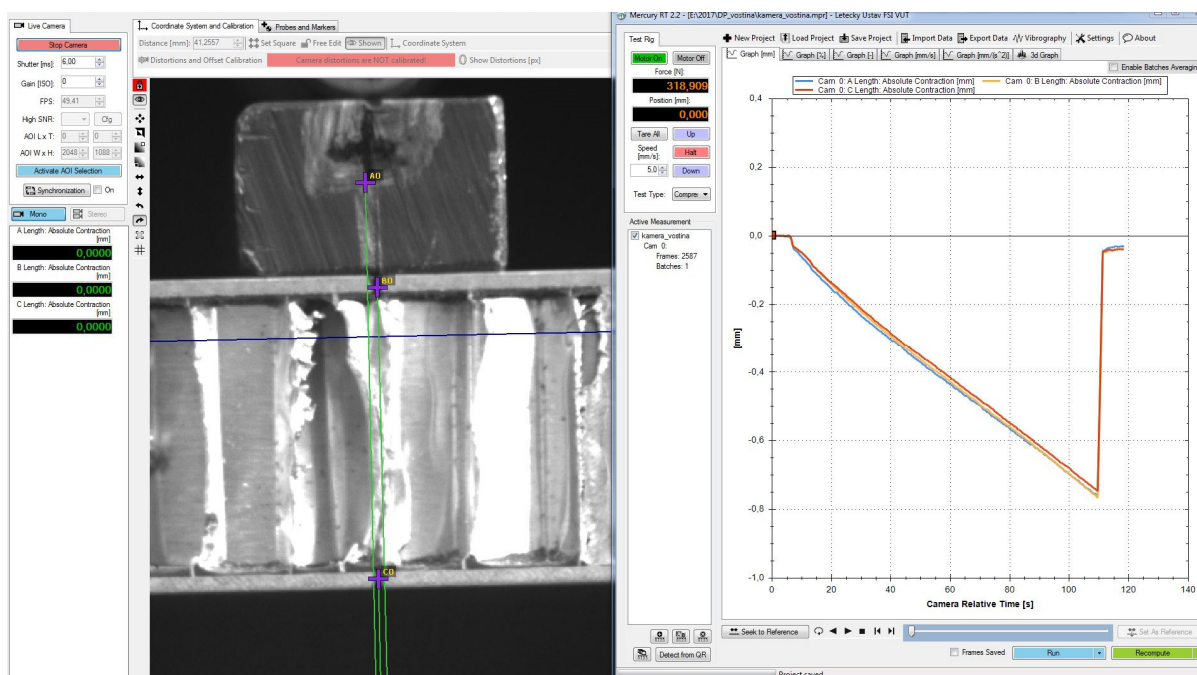
Obr. 28 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro příčný směr - po 15 -ti letech



Obr. 27 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro podélný směr - po 15 -ti letech

V několika případech byly vzorky silně ovlivněny buď výrobními nepřesnostmi nebo vnitřními vadami. Taktéž některé vzorky nebyly ideálně rovné, takže při počátečním zatěžování docházelo nejdříve k nucenému vyrovnání vzorků, což mohlo způsobit různé deformace nebo silové skoky, které mohou být zaznamenány v uvedených grafech.

Z obrázků 28 a 29 je patrné, že změna po 15 -ti letech se projevila velice výrazně. Na druhou stranu je nutné zvážit, že původní výsledky byly měřeny na jiném stroji a jiným principem odměřování průhybu. Původně byl průhyb odměřován na spodní straně vzorků digitálním úchylkoměrem a nyní byl průhyb odečítán od posuvu příčnicku stroje. Pokud došlo k větší deformaci horního potahu, projevem bude menší tuhost (modul pružnosti ve smyku). Tato skutečnost velice výrazně ovlivňuje výsledky a vliv stárnutí může být ve skutečnosti mnohem méně výrazný. Proto bylo nutné stanovit korekci opravný součinitel mezi posuvem pracovního trnu a spodním potahem. K měření byl použit optický systém, který zaznamenával posunutí jednotlivých označených částí panelu.



Obr. 29 Schema měření opravného součinitele pomocí optické metody

Bod A znázorňuje trn (posuvník), bod B horní potah a bod C dolní potah. Na obrázku 30 vpravo jsou znázorněna posunutí v jednotlivých bodech.

Podstatné je, aby hodnoty posunutí byly odečteny při stejném silovém zatížení stejně jako v případě prvního měření. Z rozdílu těchto sil a posunutí se stejným způsobem vypočetl modul pružnosti ve smyku jak pro bod A, tak pro bod C.

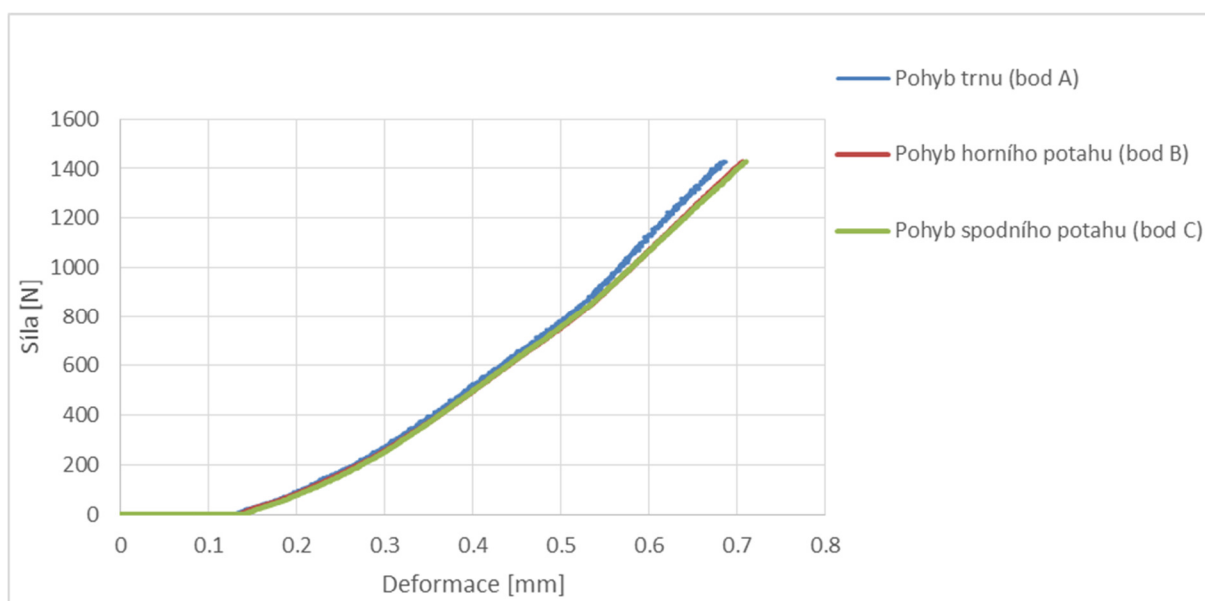
Opravný součinitel je roven:

$$k = \frac{\text{posunutí v bodě A}}{\text{posunutí v bodě C}} \quad [-] \quad (2.11)$$

Tab. 22 Tabulka opravných součinitelů k

Typ voštiny	Opravný součinitel - k
3.080 napříč	1.017
3.080 podél	1.024
4.060 napříč	1.032
4.060 podél	1.012
6.040 napříč	1.017
6.040 podél	1.011
8.030 napříč	1.025
8.030 podél	1.011

V tab.22 jsou uvedeny opravné součinitele, z nichž maximální hodnota rozdílu vzhledem k dříve naměřeným datům je 3,2 %. Tyto součinitele nemají významný vliv na změnu výsledků. Do všech uvedených výpočtů a výsledků je zahrnut opravný součinitel.



Obr. 30 Znárodnění posunutí jednotlivých bodů pro voštinu 3.080

Na obr.31 je zobrazeno posunutí jednotlivých bodů měřených při stanovení opravného součinitele. Je vidět, že posunutí horního a spodního potahu se liší velmi málo. Tuto skutečnost podpořili i vypočtené výsledky v tab.26.

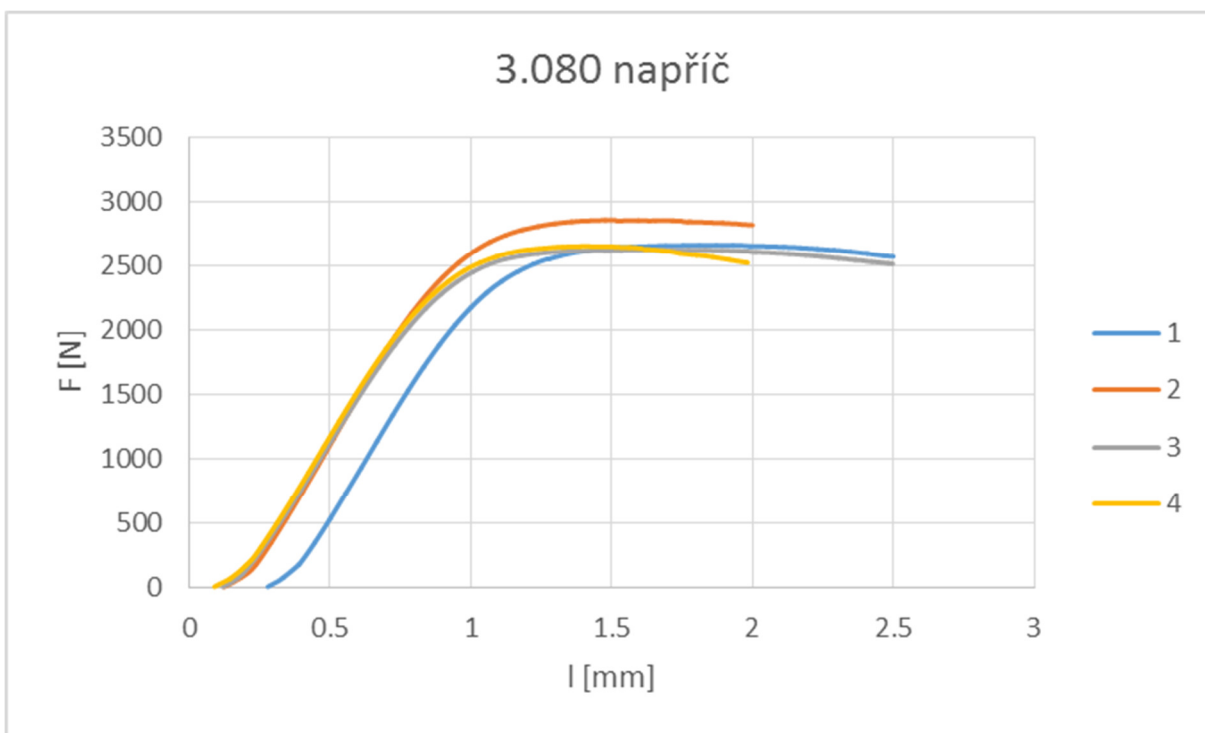
2.4 UMĚLÉ STÁRNUTÍ VZORKŮ PO 15 -TI LETECH V SOLNÉ ATMOSFÉŘE

Stárnutí probíhalo v prostředí o teplotě 35 °C a relativní vlhkosti 100 % z roztoku 5 % NaCl, který sytil okolní vzduch parami. Tyto parametry stárnutí jsou založeny na normě ČSN EN 2243-5. Vzorky byly vystaveny působení této atmosféry 40 dnů. Záznam z displeje přístroje viz. příloha P-V obr. D, rozmístění vzorků ve vypařovací nádobě obr. C. Na obr. E je zachycen vzorek po vyjmutí z komory. Na potahu jsou patrná místa napadená korozi. Předpokládá se, že tato koroze nemá významný vliv na následující zkoušky.

2.4.1 VÝSLEDKY PO STÁRNUTÍ V ATMOSFÉŘE NASYCENÉ SOLÍ

Od každé sady vzorků byly připraveny 4 kusy. Nicméně u každé sady vzorků – podél, byl jeden vzorek vyřazen z důvodů silně odlišných mechanických vlastností, které jednak mohly být způsobeny výrobním rozptylem rozměrů, vnitřními vadami nebo nerovnostmi vzorků.

Ukázka z daného měření pro voštinu typ 3.080 napříč obr.32. Ostatní průběhy z měření síla – posunutí a tabulky výpočtů viz. příloha P-VI.



Obr. 31 Graf zkoušky v ohybu voštiny 8.030 napříč (solné prostředí)

Tab. 23 Smyková napětí v jádru

Smyková napětí v jádru dle Hexcel Composites		
Typ voštiny	vzorek	τ [MPa]
3.080 - napříč	1	1.03
	2	1.11
	3	1.02
	4	1.03

Tab. 24 Napětí v potahu

Napětí potahu sendvičového panelu dle Hexcel Composites		
Typ voštiny	vzorek	σ [MPa]
3.080 - napříč	1	77.0
	2	83.2
	3	76.4
	4	77.2

Tab. 25 Maximální síly

Maximální síly		
Typ voštiny	vzorek	F_{\max} [N]
3.080 - napříč	1	2663.2
	2	2860.98
	3	2626.8
	4	2655.9

Tab. 26 Ohybové pevnosti sendviče

Maximální ohybové pevnosti		
Typ voštiny	vzorek	σ_{\max} [MPa]
3.080 - napříč	1	23.9
	2	25.9
	3	23.8
	4	24.1

Tab. 27 Modul pružnosti ve smyku

Modul pružnosti ve smyku		
Typ voštiny	vzorek	G_s [MPa]
3.080 - napříč	1	145.3
	2	155.9
	3	142.5
	4	145.0

Jeden ze sady vzorků byl vyrazen díky silně odlišným vlastnostem.

Tab. 28 Tabulka výpočtů modulu pružnosti ve smyku po 15 -ti letech a stárnutí v solné atmosféře

Výsledky po 15 - ti letech a stárnutí v solné atmosféře 40 dní								
Statistické veličiny	3.080		4.060		6.040		8.030	
	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél
\bar{x} - G_s [MPa]	148.1	241.9	114.7	183.5	70.8	112.7	48.6	108.7
σ [MPa]	5.0	10.6	7.8	11.3	5.2	14.4	5.0	6.7
s^2 [MPa ²]	24.8	113.3	61.2	128.3	27.0	206.9	25.1	45.0
MAX [MPa]	156.0	252.8	125.7	193.3	79.8	132.7	56.8	117.2
MIN [MPa]	142.2	227.5	106.3	167.7	66.8	99.6	44.0	100.8
n [-]	4	3	4	3	4	3	4	3

2.4.2 VALIDACE DAT MODULU VE SMYKU PO STÁRNUTÍ V ATMOSFÉŘE NASYCENÉ SOLÍ

Ptáme se na tutéž otázku: Je modul pružnosti ve smyku naměřený před 15 -ti lety a nyní stejný?

Testy hypotéz o parametrech σ^2_1 a σ^2_2 dvou normálních rozdělení

Stanovení první hypotézy.

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, pro náš případ platí: [12]

H_0	H_1	Testová charakteristika	Kritický obor
$\sigma^2_1 = \sigma^2_2$	$\sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$	$F_3 = \frac{\max(s_1^2, s_2^2)}{\min(s_1^2, s_2^2)}$	$F_3 > F_{\alpha/2}(n' - 1, n'' - 1)$

Testy hypotéz o parametrech μ_1 a μ_2 dvou normálních rozdělání

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, pro náš případ platí: [12]

H_0	H_1	Kritický obor
$\mu_1 = \mu_2$	$\mu_1 \neq \mu_2$	$|t| = t_{\alpha}(n_1 + n_2 - 2)$

Výsledky hypotéz při ověřování, zda $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$ (tab.33)

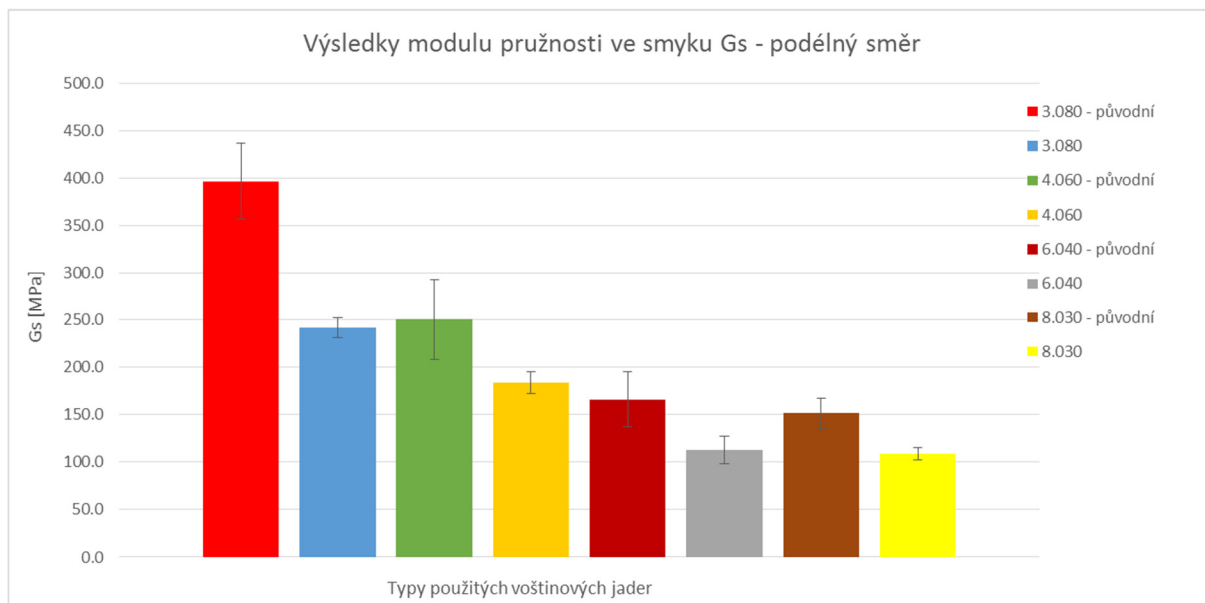
Tab. 29 Tabulka výsledků hypotézy $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$

Statistické veličiny	3.080		4.060		6.040		8.030	
	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél
Kritický obor $F_{\alpha/2}$	8.620	19.460	8.620	19.460	8.630	19.460	8.650	19.440
Testová charakteristika F_3	35.31	14.13	5.59	14.08	6.85	4.15	4.48	5.69
Stav hypotézy	Hypotézu zamítáme	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu nezamítáme

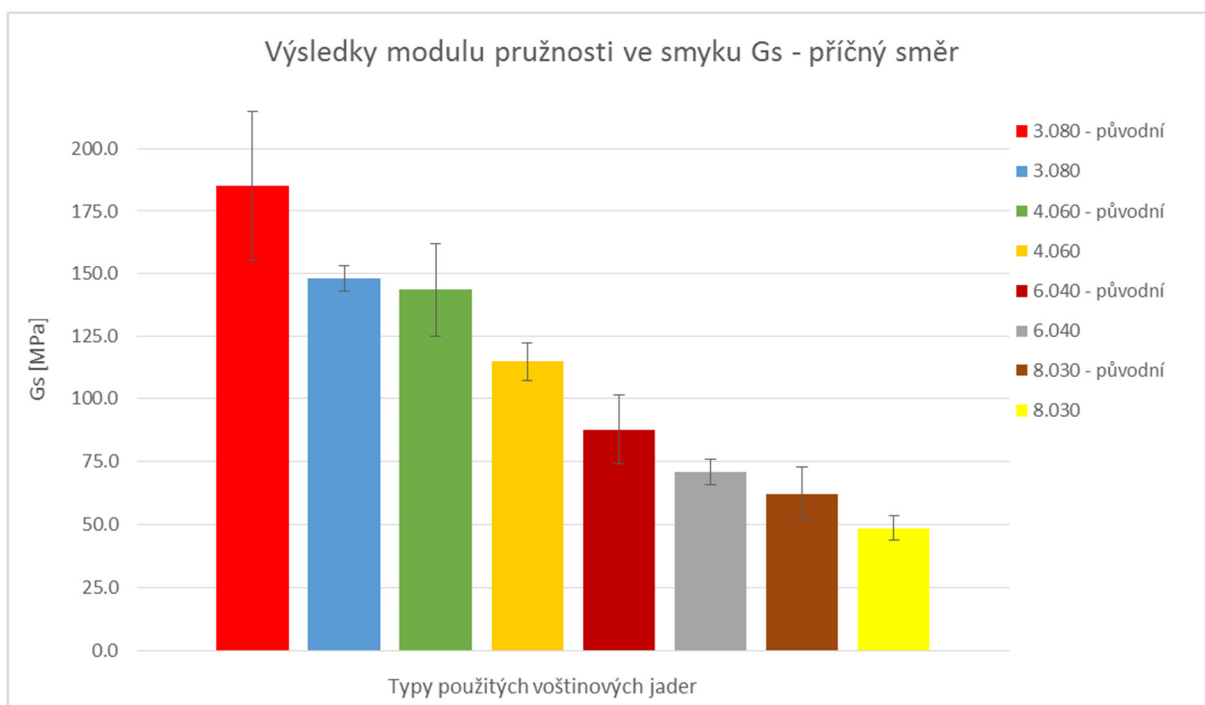
Na základě těchto výsledků přistoupíme k ověření další hypotézy, zda $\mu_1 = \mu_2$. (tab.34)

Tab. 30 Tabulka výsledků hypotézy $\mu_1 = \mu_2$

Statistické veličiny	3.080		4.060		6.040		8.030	
	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél
Testová charakteristika t	6.204	6.587	3.066	2.688	2.429	3.099	2.472	4.496
Počet stupňů volnosti s	29.68	38.74	17.77	41.21	13.03	28.66	10.09	15.42
Kritická hodnota $t_{0,05}$	2.042	2.021	2.1	2.021	2.16	2.045	2.228	2.131
Stav hypotézy	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné



Obr. 33 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro podélný směr - po 15 -ti letech +40 dnů solná atmosféra



Obr. 32 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro příčný směr - po 15 -ti letech +40 dnů solná atmosféra

Na obrázcích 33 a 34 je zachyceno srovnání původních a současných hodnot modulu pružnosti ve smyku. V několika případech byly vzorky silně ovlivněny buď výrobními nepřesnostmi nebo vnitřními vadami. Taktéž některé vzorky nebyly ideálně rovné, takže při zatěžování docházelo nejdříve k nutnému vyrovnání vzorků. To mohlo způsobit různé deformace nebo silové skoky, které mohou být zaznamenány v uvedených grafech. Takové vzorky nebyly zahrnuty do výpočtu.

Ze závěrů hypotézy plyne, že ačkoli došlo k mírnému obnovení mechanických vlastností lepidla, přesto výsledky nedosahují hodnot naměřených před 15 –ti lety. Při nasycení okolního prostředí vyšší relativní vlhkostí mohlo dojít k absorpci a následné částečné regeneraci lepidla (lepeného spoje).

2.5 UMĚLÉ STÁRNUTÍ VZORKŮ PO 15 -TI LETECH VE VLHKÉM TEPLE

Stárnutí probíhalo v prostředí o teplotě 70 °C a relativní vlhkosti 96 %. Vzorky byly vystaveny působení této atmosféry 30 dnů. Tyto parametry stárnutí jsou podloženy normou ČSN EN 2243-5. Záznam z displeje přístroje viz. Příloha P-V obr. B, rozmístění vzorků v klimatizační komoře obr. A.

2.5.1 VÝSLEDKY PEVNOSTI V TLAKU VZORKŮ STÁRNUTÝCH VE VLHKÉM TEPLE

V případě stárnutí v prostředí vlhkého tepla bylo přikročeno nejen ke zkouškám ohybovým, ale taktéž tlakovým. Naměřené a vypočtené hodnoty jsou zde uvedeny jen pro voštinu 8.030, výsledky pro další typy voštin jsou uvedeny v příloze P-VII.

Tab. 32 Tlakové pevnosti vzorků voštiny 8.030

Výsledky po 15-ti letech a 30-ti dnech vlhkého tepla				
Typ voštiny	R _d [MPa]	σ _{n-1} [MPa]	s ² [MPa ²]	n [-]
3.080	3.621	0.619	0.3834	5
4.060	1.953	0.372	0.1383	5
6.040	1.053	0.050	0.0025	5
8.030	0.665	0.100	0.0100	5

Tab. 31 Tabulka výsledků vypočtených pevností v tlaku

Označení vzorku	R _d [MPa]
1	0.69
2	0.69
3	0.48
4	0.79
5	0.68
\bar{x}	0.66
σ	0.1001
s ²	0.0100
MAX	0.79
MIN	0.48

2.5.2 VALIDACE DAT TLAKOVÉ PEVNOSTI PO STÁRNUTÍ V ATMOSFÉŘE VLHKÉHO TEPLA

Ptáme se na tutéž otázku: Je pevnost v tlaku naměřená před 15 -ti lety a nyní stejná?

Testy hypotéz o parametrech σ²₁ a σ²₂ dvou normálních rozdělení

Stanovení první hypotézy.

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, pro náš případ platí: [12]

H ₀	H ₁	Testová charakteristika	Kritický obor
σ ² ₁ = σ ² ₂	σ ² ₁ ≠ σ ² ₂	$F_3 = \frac{\max(s_1^2, s_2^2)}{\min(s_1^2, s_2^2)}$	$F_3 > F_{\alpha/2}(n' - 1, n'' - 1)$

Testy hypotéz o parametrech μ_1 a μ_2 dvou normálních rozdělení

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, pro náš případ platí: [12]

H_0	H_1	Kritický obor
$\mu_1 = \mu_2$	$\mu_1 \neq \mu_2$	$|t| = t_{\alpha}(n_1 + n_2 - 2)$

Výsledky hypotéz při ověřování, zda $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$

Tab. 33 Tabulka výsledků hypotézy $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$

Typ voštiny	Kritický obor	Testová charakteristika	Stav hypotézy
	$F_{\alpha/2}$	F_3	
3.080	2.7	2.2366	Hypotézu nezamítáme
4.060	2.86	3.0194	Hypotézu zamítáme
6.040	5.74	15.2687	Hypotézu zamítáme
8.030	2.7	1.2928	Hypotézu nezamítáme

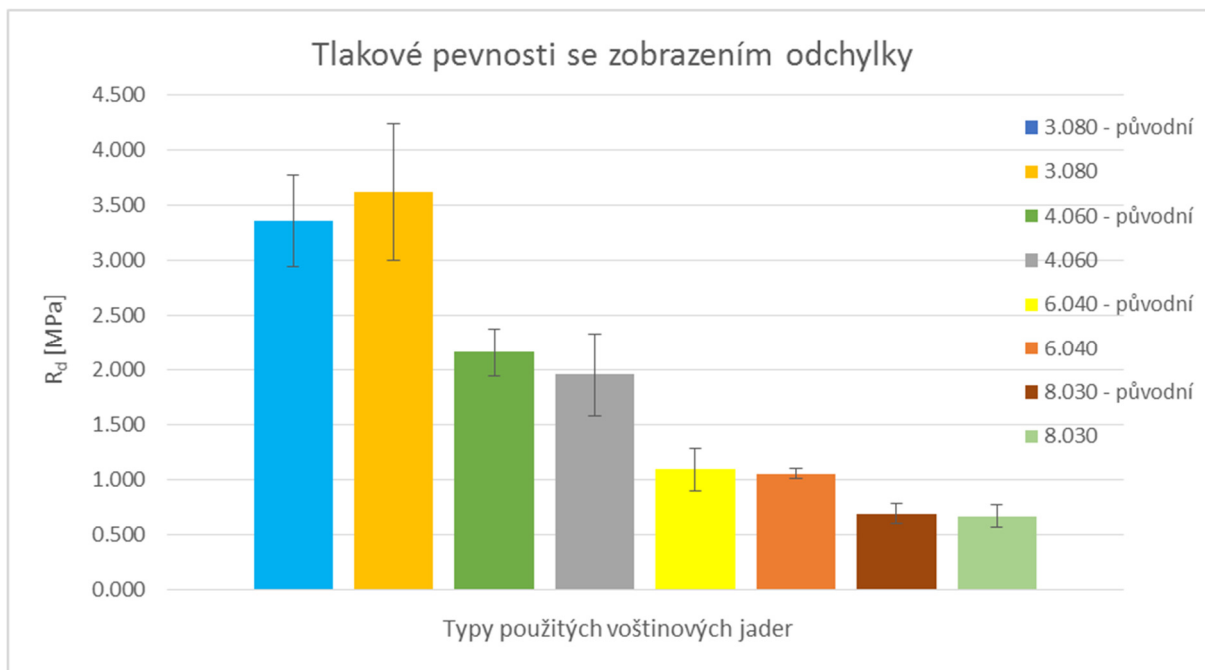
Na základě těchto výsledků přistoupíme k ověření další hypotézy, zda $\mu_1 = \mu_2$.

Tab. 34 Tabulka výsledků hypotézy $\mu_1 = \mu_2$

Typ voštiny	s	Testová charakteristika	Kritická hodnota	Stav hypotézy
		t	$t_{0.05}$	
3.080	0.4439	1.2171	2.0423	Hypotézu nezamítáme – soubory jsou totožné
8.030	0.0895	0.5549	2.0423	Hypotézu nezamítáme - soubory jsou totožné

Tab. 35 Tabulka výsledků hypotézy $\mu_1 = \mu_2$ pokračování

Typ voštiny	Testová charakteristika	Počet stupňů volnosti	Kritická hodnota	Stav hypotézy
	t	v	$t_{0.05}$	
4.060	1.2099	4.3651	2.7760	Hypotézu nezamítáme - soubory jsou totožné
6.040	0.9167	26.5483	2.0510	Hypotézu nezamítáme - soubory jsou totožné



Obr. 34 Graf tlakové pevnosti se zobrazením odchylky – po 15 -ti letech + 30 dnů vlhké teplo

Mnoho vzorků bylo při zkoušení vyraženo. Tento problém byl zapříčiněn různě velkými buňkami voštinového jádra, rozptylem výrobních nepřesností, ale taktéž vliv na výsledky může mít skutečnost, že některé vzorky měly uspořádání buněk napříč a jiné podél. Jak bylo popsáno, dochází ke zdvojení stěn, z čehož může plynout vyšší únosnost.

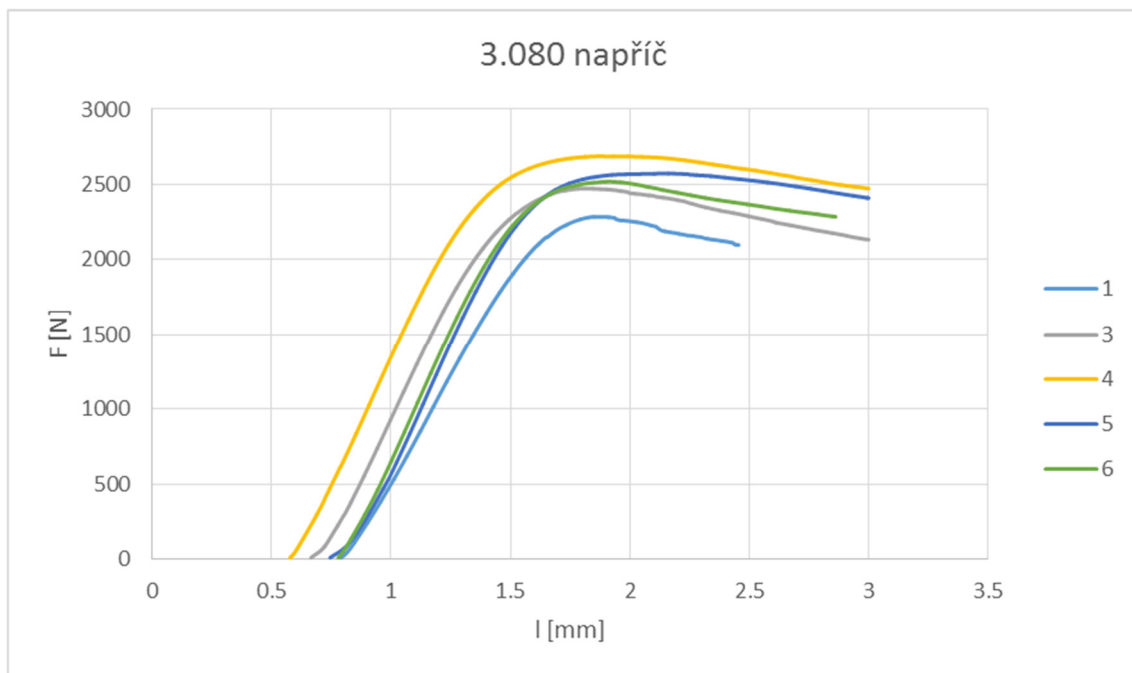
Z obrázku 35 je vidět, že naměřené hodnoty jsou v odchylce původních měření, z čehož lze usoudit, že zde se stárnutí neprojeví. Tento fakt potvrzuje i stanovená statistická analýza.

Fotografie v příloze P-X zachycují charakter poškození při tlakové zkoušce.

2.5.3 VÝSLEDKY PO STÁRNUTÍ V ATMOSFÉŘE VLHKÉHO TEPLA

Do komory bylo vloženo od každé sady 6 vzorků. Nicméně u každé sady vzorků byl jeden vzorek vyražen z důvodů silně odlišných mechanických vlastností. Tyto odlišnosti mohly být způsobeny výrobním rozptylem rozměrů, vnitřními vadami nebo nerovností vzorků.

Voština 8.030 – napříč viz. obr.36 je zde uvedena jako zástupce, další průběhy zatěžování ostatních vzorků jsou i s výsledky uvedeny v příloze P VIII.



Obr. 35 Graf zkoušky v ohybu voštiny 3.080 napříč

Tab. 36 Smyková napětí v jádru

Smyková napětí v jádru dle Hexcel Composites		
Typ voštiny	vzorek	τ [MPa]
3.080 - napříč	1	0.89
	3	0.96
	4	1.04
	5	1.01
	6	0.98

Tab. 37 Napětí v potahu

Napětí potahu sendvičového panelu dle Hexcel Composites		
Typ voštiny	vzorek	σ [MPa]
3.080 - napříč	1	66.8
	3	72.3
	4	77.7
	5	75.7
	6	73.7

Tab. 38 Maximální síly

Maximální síly		
Typ voštiny	vzorek	F_{max} [N]
3.080 - napříč	1	2285.2
	3	2473.4
	4	2688.6
	5	2573.5
	6	2519.4

Tab. 39 Ohybové pevnosti sendviče

Maximální ohybové pevnosti		
Typ voštiny	vzorek	σ_{max} [MPa]
3.080 - napříč	1	20.9
	3	22.6
	4	24.1
	5	23.8
	6	23.1

Tab. 40 Modul pružnosti ve smyku

Modul pružnosti ve smyku		
Typ voštiny	vzorek	Gs [MPa]
3.080 - napříč	1	125.9
	3	135.3
	4	137.2
	5	130.7
	6	144.0

Tab. 41 Výsledky po 30 -ti denním stárnutí v prostředí vlhkého tepla

Výsledky po 15 - ti letech a stárnutí ve vlhkém teple 30 dní								
Statistické veličiny	3.080		4.060		6.040		8.030	
	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél
\bar{x} - Gs [MPa]	134.6	250.6	111.9	191.0	53.0	113.2	47.2	97.6
σ [MPa]	6.1	12.4	6.5	5.9	9.0	15.8	4.2	7.7
s^2 [MPa ²]	37.7	154.5	42.5	34.8	81.8	249.7	17.7	59.6
MAX [MPa]	144.0	274.7	122.0	199.6	62.9	144.0	52.1	104.6
MIN [MPa]	125.9	241.1	104.8	184.3	41.1	100.8	39.9	82.8
n [-]	5	5	5	5	5	5	5	5

2.5.4 VALIDACE DAT SMYKOVÉHO MODULU PO STÁRNUTÍ V ATMOSFÉŘE VLHKÉHO TEPLA

Ptáme se na tutéž otázku: Je modul pružnosti ve smyku naměřený před 15 -ti lety a nyní stejný?

Testy hypotéz o parametrech σ^2_1 a σ^2_2 dvou normálních rozdělení

Stanovení první hypotézy.

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, pro náš případ platí: [12]

H_0	H_1	Testová charakteristika	Kritický obor
$\sigma^2_1 = \sigma^2_2$	$\sigma^2_1 \neq \sigma^2_2$	$F_3 = \frac{\max(s_1^2, s_2^2)}{\min(s_1^2, s_2^2)}$	$F_3 > F_{\alpha/2}(n' - 1, n'' - 1)$

Testy hypotéz o parametrech μ_1 a μ_2 dvou normálních rozdělení

Kritické obory testů na hladině významnosti α jsou dány pro jednotlivé dvojice hypotéz, pro náš případ platí: [12]

H_0	H_1	Kritický obor
$\mu_1 = \mu_2$	$\mu_1 \neq \mu_2$	$|t| = t_{\alpha}(n_1 + n_2 - 2)$

Tab. 42 Tabulka výsledků hypotézy $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$

Statistické veličiny	3.080		4.060		6.040		8.030	
	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél
Kritický obor $F_{\alpha/2}$	5.750	5.755	5.750	5.750	5.755	5.730	5.780	5.790
Testová charakteristika F_3	23.24	10.36	8.06	51.90	2.26	3.44	6.36	4.29
Stav hypotézy	Hypotézu zamítáme	Hypotézu zamítáme	Hypotézu zamítáme	Hypotézu zamítáme	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu nezamítáme	Hypotézu zamítáme	Hypotézu nezamítáme

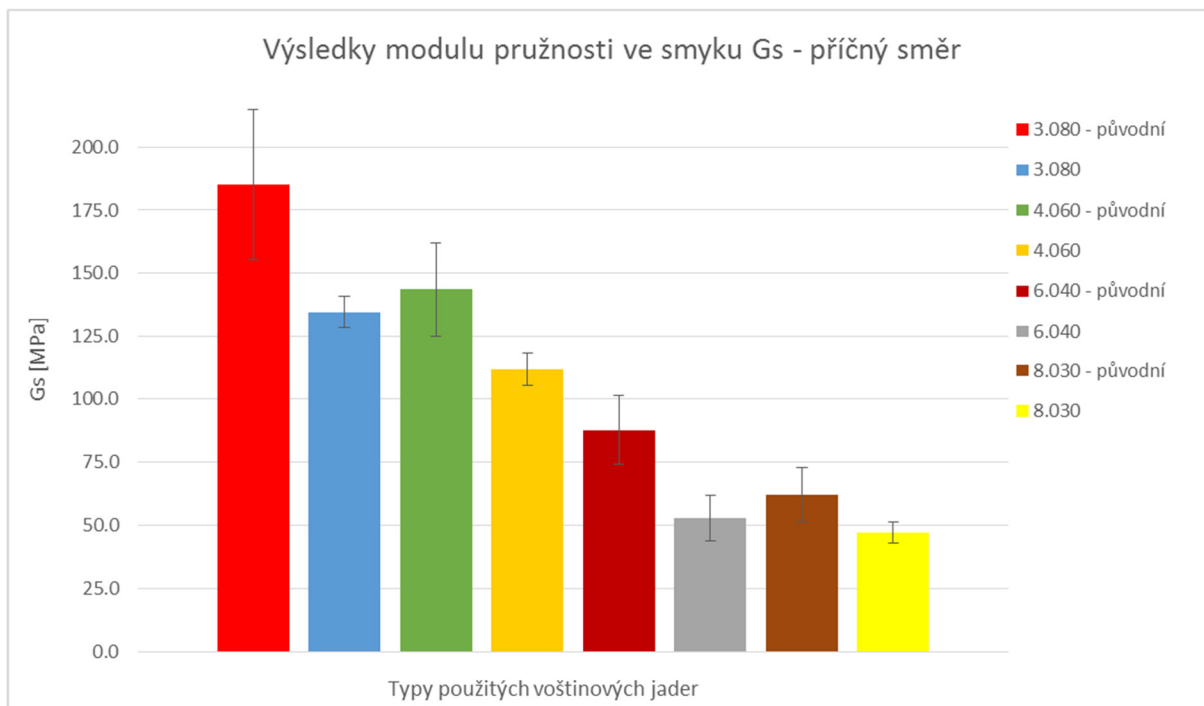
Výsledky hypotéz při ověřování, zda $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$.

Na základě těchto výsledků přistoupíme k ověření další hypotézy, zda $\mu_1 = \mu_2$.

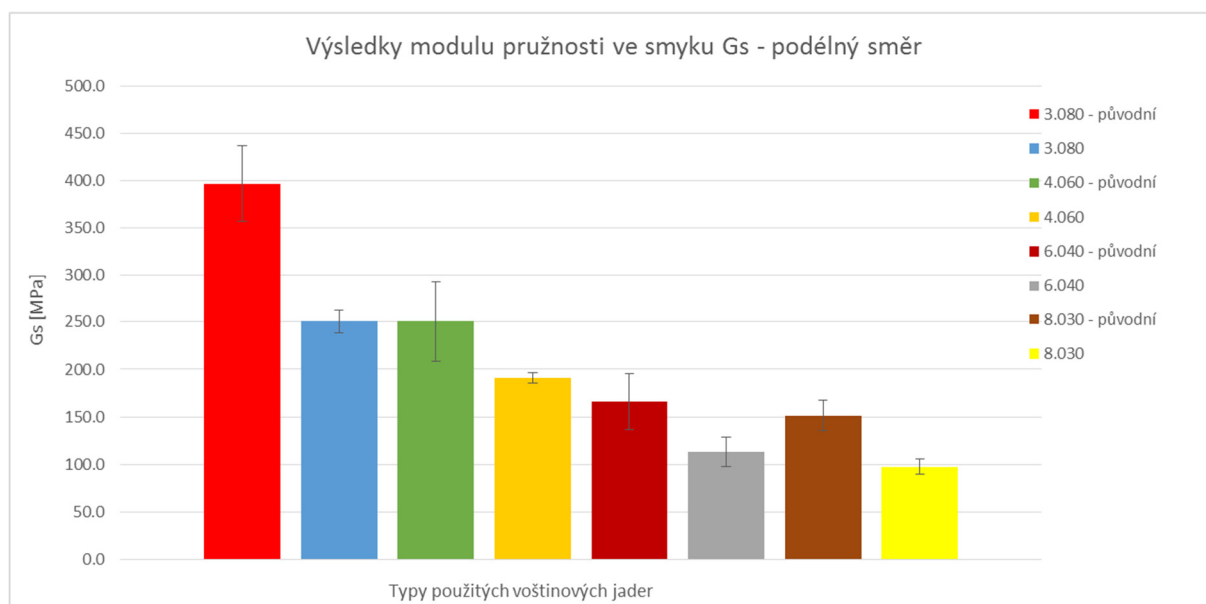
Tab. 43 Tabulka výsledků hypotézy $\mu_1 = \mu_2$

Statistické veličiny	3.080		4.060		6.040		8.030	
	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél	napříč	podél
Testová charakteristika t	8.309	15.752	7.140	7.275	5.464	3.929	5.122	7.251
Počet stupňů volnosti s, v	30.95	21.32	17.59	32.90	13.12	28.15	16.85	14.99
Kritická hodnota $t_{0,05}$	2.04	2.079	2.1	2.035	2.16	2.048	2.109	2.131
Stav hypotézy	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné	Hypotézu zamítáme, soubory jsou odlišné

Stejně jako v případě stárnutí v solné atmosféře, tak i zde došlo k nasycení okolního prostředí vyšší relativní vlhkostí. Mohlo dojít k absorpci a následné částečné regeneraci lepidla (lepeného spoje). Oproti případu solné atmosféry byla zvýšena i teplota. Na základě statistické analýzy můžeme rozhodnout, že vlastnosti celého sendvičového panelu jsou nižší než před 15-ti lety. Totéž lze odečíst z obrázků 37 a 38.



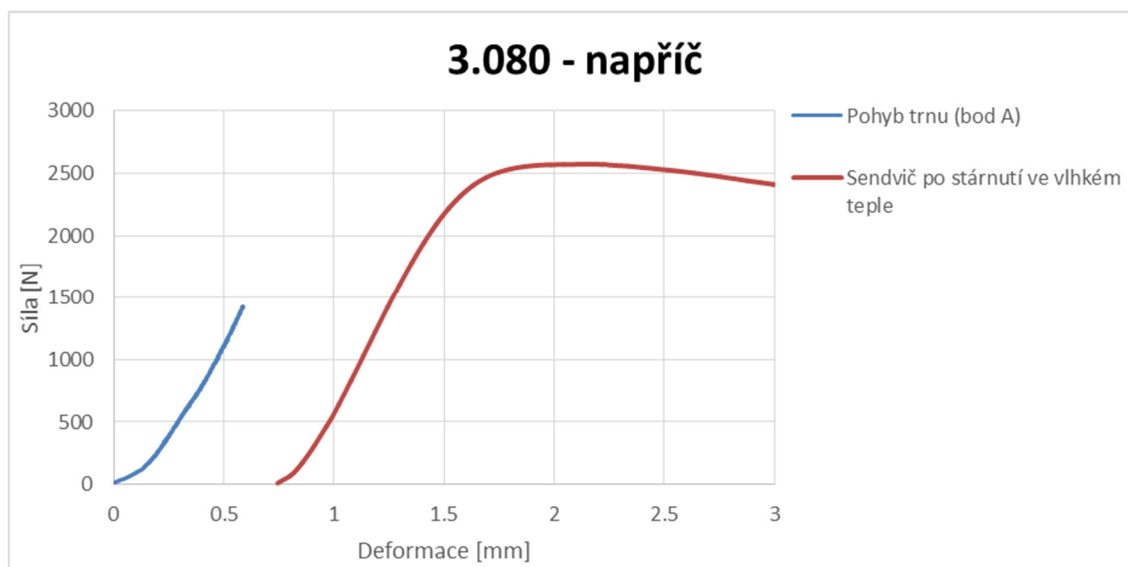
Obr. 37 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro příčný směr – po 15 -ti letech + 30 dnů vlhké teplo



Obr. 36 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro podélný směr – po 15 -ti letech + 30 dnů vlhké teplo

2.5.5 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VLHKÉHO TEPLA A DAT MĚŘENÍ KOREKCE

Můžeme porovnat výsledky smykového modulu, které jsme vypočetli při měření korekce, s výsledky smykového modulu vypočteného při stárnutí ve vlhkém teple. Tyto vzorky jsou naprosto totožné, nejdříve na nich byla naměřena korekce a následně putovaly do klimatizační komory. Obrázek 39 ukazuje trendy křivek z obou zatěžování. Modrá křivka je měřena pro korekci měření, červená je vlastní měření ze stárnutí ve vlhkém teple. Z grafu je vidět, že trend křivek je velmi podobný. Trendy dalších křivek uvedeny v příloze P-IX.



Obr. 38 Graf porovnání naměřených dat z měření korekce a stárnutí ve vlhkém teple pro voštinu 3.080 napříč

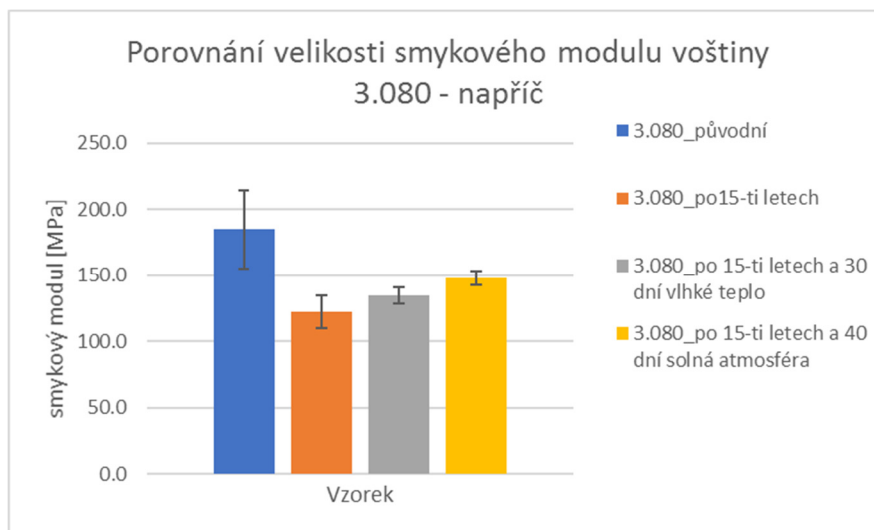
Tab. 44 Tabulka výsledných vypočtených smykových modulů a jejich porovnání

TYP VOŠTINY	NAPŘÍČ		ROZDÍL	PODÉL		ROZDÍL
	Gs [MPa]		%	Gs [MPa]		%
3.080	120.1	130.70	8.1	231.7	274.7	15.7
	121.1	144.0	15.9	235.4	244.8	3.8
	X			161.0	184.3	12.6
4.060	Gs [MPa]		%	Gs [MPa]		%
	104.6	104.8	0.2	161.3	190.7	15.42
	X			161.0	184.3	12.6
6.040	Gs [MPa]		%	Gs [MPa]		%
	48.1	60.9	21.0	106.2	110.9	4.2
	48.0	62.9	23.7	X		
8.030	Gs [MPa]		%	Gs [MPa]		%
	31.0	46.8	33.8	77.2	82.8	6.8
	31.3	46.8	33.1	X		

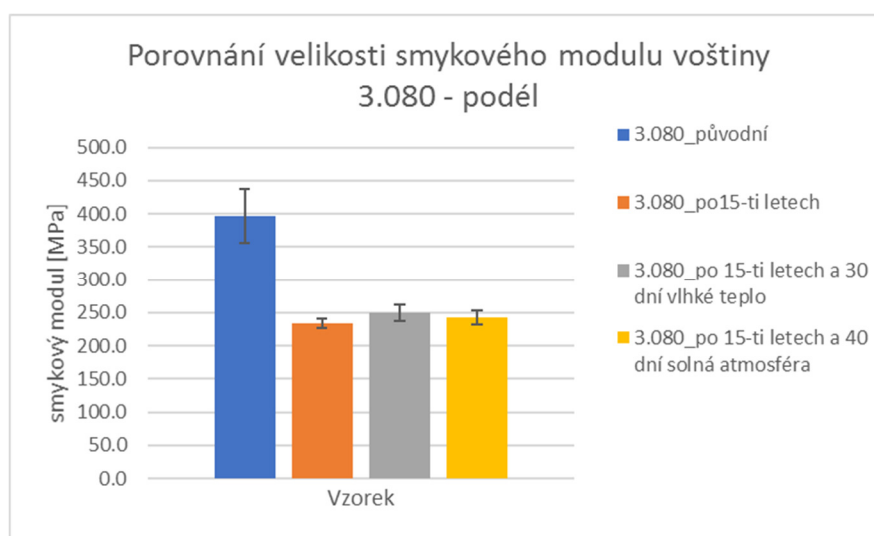
Tabulka 44 ukazuje, že došlo ke změně mechanických vlastností lepidla. V některých případech více v některých méně, v průměru je ovlivnění vlastností +15 % oproti vzorkům, které byly stárnuté v normální atmosféře po dobu 15 -ti let.

2.6 POROVNÁNÍ SMYKOVÉHO MODULU DLE TYPŮ A SMĚRŮ VOŠTIN

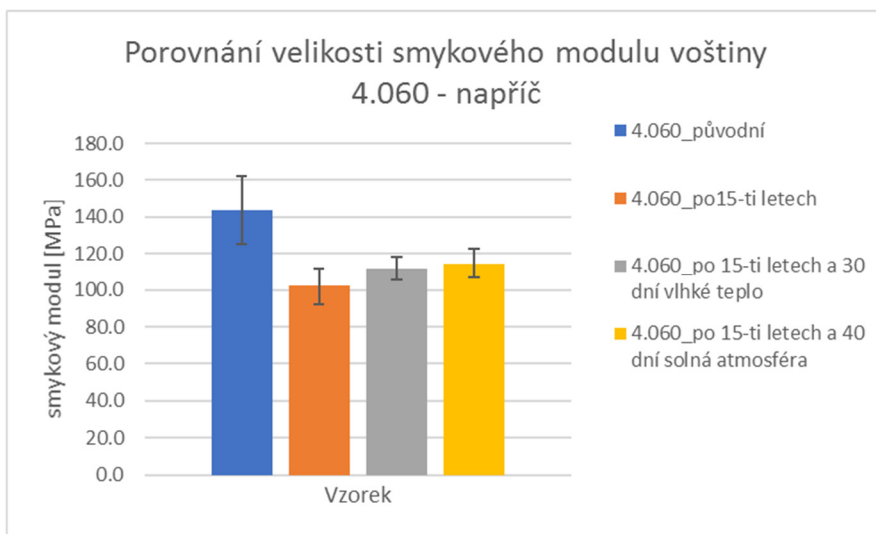
Na obrázcích 40 až 47 je zobrazeno grafické porovnání velikosti smykového modulu ve všech čtyřech stádiích změn. Tyto obrázky jsou podrobněji okomentovány v závěru práce.



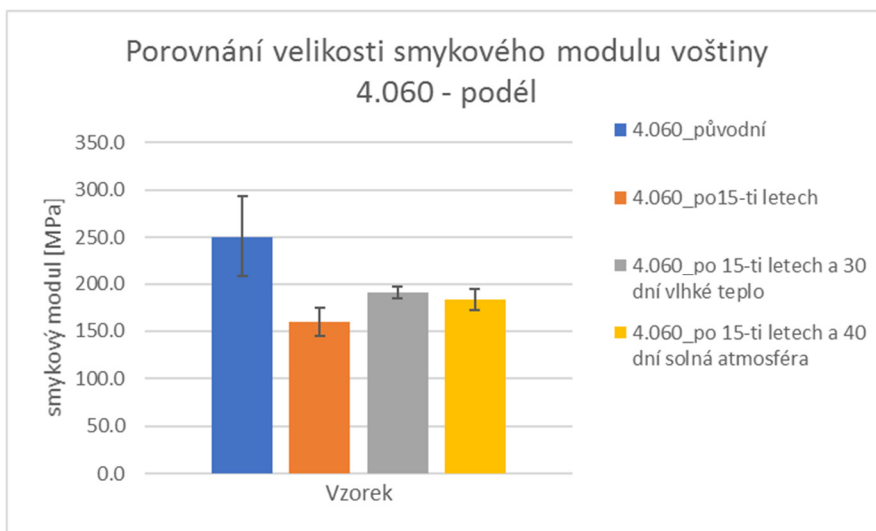
Obr. 39 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 3.080 - napříč



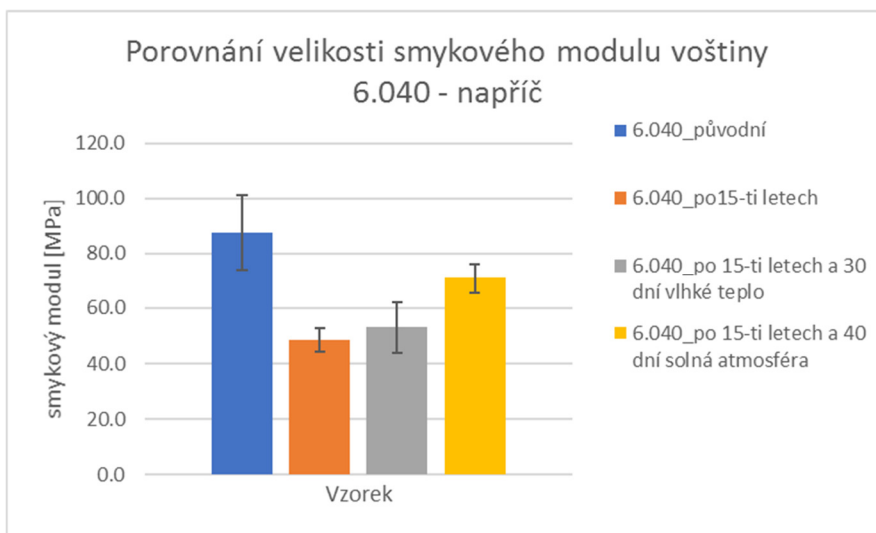
Obr. 40 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 3.080 - podél



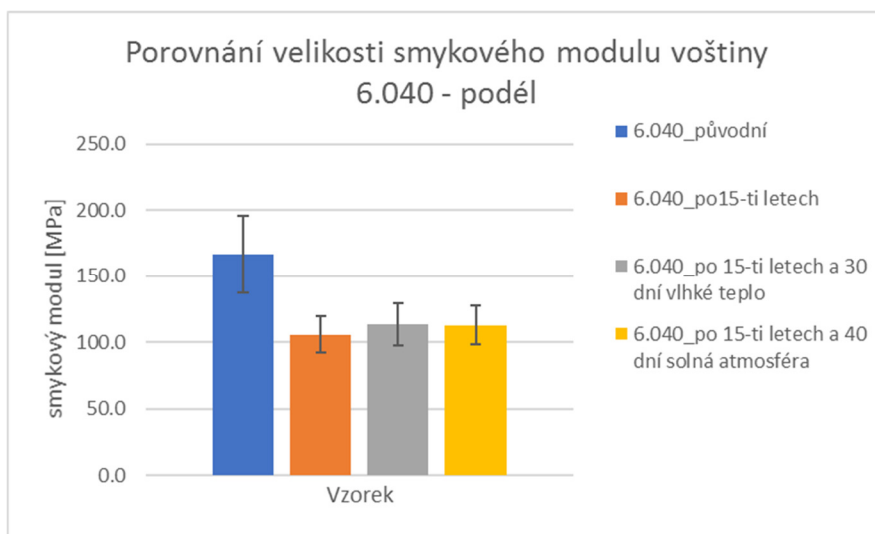
Obr. 41 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 4.060 - napříč



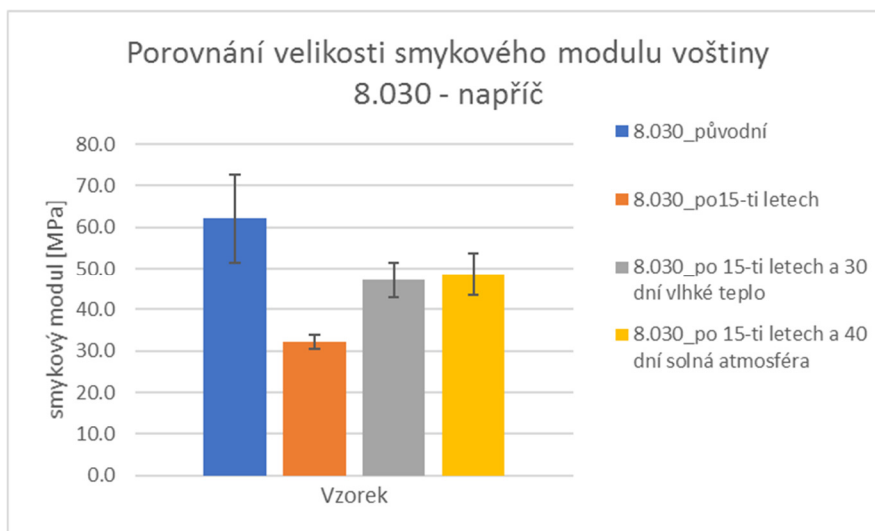
Obr. 42 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 4.060 - podél



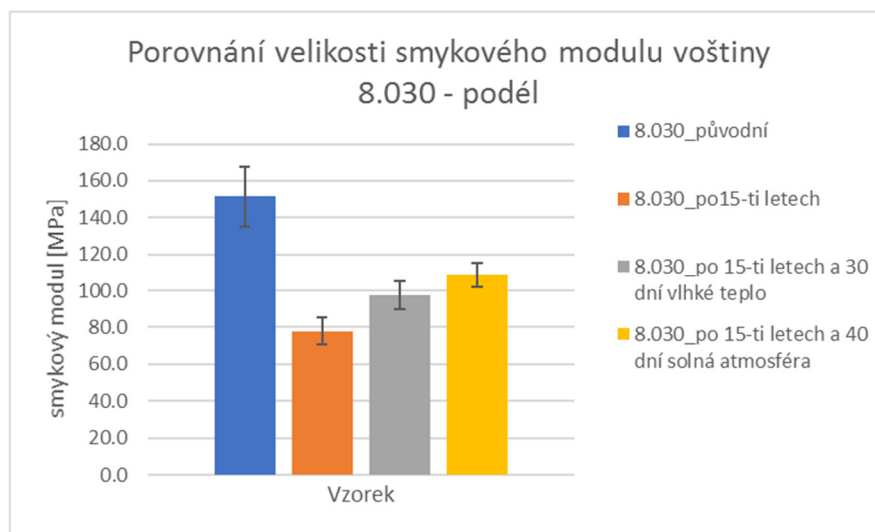
Obr. 43 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 6.040 - napříč



Obr. 44 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 6.040 - podél



Obr. 45 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 8.030 - napříč



Obr. 46 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 8.030 - podél

ZÁVĚR

Jak bylo zmíněno v úvodní kapitole, proces stárnutí je nevyhnutelný, nicméně je třeba k tomuto problému zaujmout potřebné stanovisko. Na stránkách výše je popsán postup, jak je možné stanovit rozdíl mezi mechanickými vlastnostmi naměřenými před několika lety a nyní. Stejně tak jsou uvedeny vybrané druhy umělého stárnutí, které mají také určitý vliv.

Po prostudování katalogů a dostupných materiálů od výrobce nebyly nalezeny žádné informace o vlivu okolních podmínek na použité lepidlo. Proto tato diplomová práce je z hlediska vlastní zkušenosti autora s tímto problémem velice zajímavá a přínosná.

Zkoušky byly rozděleny do několika etap zkoušení. Jejich chronologičnost uvádí práce samotná.

Pro statistické vyhodnocení v diplomové práci by bylo zcela jistě vhodnější experimentálně změřit více vzorků. Ale již při vzniku práce byl počet vzorků omezen. Jak bylo popsáno, tato práce navazuje na rozsáhlé zkoušky z roku 2001, kdy nebyly využity všechny vzorky. Na těchto zbylých vzorcích byly prováděny experimenty, které jsou popsány v této práci. Další omezení bylo způsobeno také tím, že v rámci experimentu bylo nutné vložit zkoušené vzorky do vícero agresivních prostředí a následně zkoumat jejich vliv. Byl omezen i prostor (časový i kapacitní) v komorách pro stárnutí vzorků. Velkou časovou náročnost si vyžádalo rovněž stárnutí vzorků, samotné zkoušení a následné vyhodnocení výsledků.

Výsledky měření vykazují velké rozptyly, které jsou důsledkem mnoha faktorů. Důležitým parametrem je dodržení velikosti voštinového jádra. Nedodržení této hodnoty bylo příčinou vyřazení několika vzorků. Dalším předmětem k zamyšlení je i výskyt vnitřních skrytých vad voštinového jádra. Je důležité zmínit, že sendvičové panely byly dodávány v různých šaržích, což mohl být další z vlivů, který se projevil jako výrobní a technologický rozptyl vlastností. Dodané vzorky rovněž nebyly ideálně rovné. Proto u tlakové zkoušky i přes veškerou snahu přesně vyrovnat zkoušený díl mohlo dojít k dřívějšímu zatížení jen jednoho rohu (díky výrobním nepřesnostem), tím mohla být samozřejmě celková tlaková pevnost nižší. O nepřesnostech dodaných panelů je taktéž pojednáváno v literatuře [11], z toho lze usuzovat, že výrobky nebyly poškozeny skladováním, ale v takovém stavu už byly dodány.

Porovnáním naměřených a vypočtených výsledků lze provést následující vyhodnocení. Tlaková pevnost byla zachována (v rámci odchylky). Toto odpovídá představě, že lepidlo, které by mohlo být nejslabším článkem, nemá při tlaku výrazný vliv. Z hlediska ovlivnění lepidla dobou stárnutí byly zajímavější zkoušky ohybové, které sloužily ke stanovení modulu pružnosti ve smyku. Výsledky zkoušení po 15 -ti letech stárnutí v normálních atmosférických podmínkách v krytém prostředí uvádí kapitola 2.3.5. Vliv stárnutí se na vzorcích projevil velmi výrazně. Kapitola 2.4 a 2.5 uvádí vzorky po 15 -ti letech plus další umělé stárnutí, 15 let + prostředí nasycené parami NaCl, 15 let + prostředí vlhkého tepla. V obou těchto prostředích dochází k určitému nárůstu – zlepšení smykového modulu. Není snadné prohlásit, zda působením zvýšené vlhkosti a teploty došlo k regeneraci vlastností, kdy přítomná vlhkost by byla absorbována lepidlem. U většiny případů je poměrně velký rozptyl v tom ohledu, že se překrývá s hodnotami naměřenými pouze po 15 -ti letech stárnutí (bez přídavného umělého stárnutí). Abychom mohli učinit rozhodnutí, zda došlo ke zlepšení vlastností nebo, zda tyto výsledky jsou zahrnuty do určitého rozptylu mechanických vlastností, by vyžadovalo další, podrobnější zkoušení (více vzorků) a větší zaměření pouze na tento problém.

Porovnání smykového modulu ze všech zkoušek je uvedeno v kapitole 2.6. Zde je zobrazen trend, kdy původní hodnoty jsou nejvyšší. Výsledky po 15 -ti letech jsou s určitým poklesem – způsobeným stárnutím lepidla, následně může být pozorováno, že v solné atmosféře i v atmosféře vlhkého tepla došlo ke změně (mírnému zvýšení) smykového modulu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] History of the de Havilland Mosquito [Online], [Citace: 3. listopad. 2016]
http://www.airforce.gov.au/raafmuseum/exhibitions/restoration/dh_98.htm
- [2] Sandwich core [Online], [Citace: 3. listopad. 2016]
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/Sandwich_core.jpg
- [3] DMM Průmyslové spektrum. *Sendvičové konstrukce*. [Online]. 2001
[Citace: 5. listopad. 2016].
<http://www.mmspektrum.com/clanek/sendvicove-konstrukce.html>
- [4] Foam Core Glass Fibre Sandwich vs Marine Plywood. [Online]. 2012 [Citace: 5. listopad. 2016]
<http://www.piano-tuning.co.uk/foam-core-glass-fibre-sandwich-vs-marine-plywood/>
- [5] **HEXCEL**, *Sandwich panel fabrication technology*. Duxford. [Online], [Citace: 5. listopad. 2016]
<http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets>
- [6] *Kompozitní materiály* [Online], [Citace: 5. listopad. 2016]
http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [7] **BENEŠ. L.** Kompozity. [Online], [Citace: 5. listopad. 2016]
http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/matlet/07_Kompozity.ppt
- [8] **GURIT**. *Structural core materials*. [Online], [Citace: 6. listopad 2016]
<http://www.gurit.com/structural-cores.aspx>
- [9] **BASF**. *Divinycell F*. [Online], [Citace: 6. listopad. 2013]
http://www.aerospace.basf.com/common/pdfs/BASF_Divinycell_F_DS_USL_sfs.pdf
- [10] **ROHACELL**. *ROHACELL XT*. [Online], [Citace: 6. listopad. 2016]
<http://www.rohacell.com/sites/lists/PP-HP/Documents/ROHACELL%20XT%20Product%20Information.pdf>
- [11] **KLEMENT.J.** *Mechanické vlastnosti hliníkových voštinových jader 5M*. Brno, 2002. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [12] **EGERMAYER**, František a Milan **BOHÁČ**. *Statistika pro techniky*. Praha: SNTL, 1984.
- [13] **HEXCEL**, *Honeycomb Sandwich Design Technology*. Duxford. [Online], [Citace: 20. listopad. 2016]
<http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets>
- [14] **C 393 -00**. *Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions*. 27.1.2015. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [15] **MARSHALL**, C. Andrew. *Sandwich construction. Handbook of composites*. Springer. 1998.

- [16] **PILATO**, Louis A.; **MICHNO**, Michael J. *Advanced composite materials*. Springer Science & Business Media, 1994.
- [17] **HEXCEL**, *Honeycomb Attributes and Properties*. [Online], [Citace: 3. leden 2017] <http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-Data-Sheets>
- [18] **DIAB**, *DIAB guide to Core and sandwich*. Laholm. [Online], [Citace: 3. leden 2017] <http://www.diabgroup.com/Manuals/DataSheet>
- [19] **ALHONEYCOMB**, *Aluminium honeycomb*. [Online], [Citace: 3. leden 2017] http://www.form-composite.com/sortiment_zeleznice.htm
- [20] **ECPLAZA**, *Nomex honeycomb*. [Online], [Citace: 3. leden 2017] <http://www.ecplaza.net/product/nomex-honeycomb--259166-2000943.html>
- [21] **FRPONLINE**, *KAPEX C51 Industrial Foam Sandwich*. [Online], [Citace: 3. leden 2017] http://www.frponline.com/sell/detail_263.html
- [22] **KLEMENT. J**, *Výroba sendvičových konstrukcí*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Brno, 2015
- [23] **BROUGHTON**, *Review of Durability Test Methods and Standards for Assessing Long Term Performance of Adhesive Joints*. London, 1997
- [24] **D1781**, *Standard Test Method for Climbing Drum Pell for Adhesives*. 17.5.2015. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [25] **ZENKER. D**, *Sandwich Constructions*. London, Emas, 2000
- [26] **ČVUT**, *Studentovo rozdělení*. [Online], [Citace: 15. leden 2017] <http://www1.fs.cvut.cz/cz/U218/pedagog/predmety/3rocnik/tem/powersus/studroz.htm>
- [27] **KOHOUT. A**, *Fisherovo rozdělení* [Online], [Citace: 15. leden 2017] http://www.kmt.zcu.cz/person/Kohout/info_soubory/letnisem/tabulky.htm
- [28] **LEE, Lieng-Huang**. *Adhesive bonding*. New York: Plenum Press, c1991. ISBN 0306434717.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

F	[N]	síla
L	[mm]	vzdálenost podpor
k_b	[-]	průhybový součinitel od ohybu
k_s	[-]	průhybový součinitel od smyku
D	[Nmm ²]	ohybová tuhost panelu
c	[mm]	tloušťka jádra
t	[mm]	tloušťka potahu
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu materiálu potahu
G_s	[MPa]	modul pružnosti ve smyku jádra
R_d	[MPa]	pevnost v tlaku
F_{max}	[N]	maximální zatěžovací síla
S	[mm ²]	plocha průřezu vzorku
τ	[MPa]	smykové napětí v jádru
P	[N]	zatěžovací síla
d	[mm]	tloušťka sendviče
Δ	[mm]	průhyb panelu
b	[mm]	šířka vzorku
σ	[MPa]	ohybové napětí
U	[N]	smyková tuhost panelu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Sendvičová konstrukce [2]	10
Obr. 2 Skladba sendvičového panelu [2]	11
Obr. 3 Zobrazení složek namáhání při ohybu [3]	11
Obr. 4 Porovnání pevnosti a tuhosti v ohybu [4]	12
Obr. 5 Polymerní pěny [21]	14
Obr. 6 a) šestihránná voština, b) OX voština, c) vlnitá voština, d) dvojité vlnitá voština [16]	15
Obr. 7 Hliníková voština [19]	16
Obr. 8 Nomexová voština [20]	16
Obr. 9 Znázornění "mechanických zámků" [28]	18
Obr. 10 Schema oxidického filmu - CAA [28]	19
Obr. 11 Schema oxidického filmu - PAA [28]	19
Obr. 12 Schematické zobrazení lepení voštinového jádra	21
Obr. 13 Změna mechanických vlastností lepeného spoje při ponoření do vody [28]	22
Obr. 14 Schema tří bodové zkoušky v ohybu [25]	23
Obr. 15 Schema zkoušky v tahu [22]	23
Obr. 16 Schema zkoušky ve smyku [22]	24
Obr. 17 Schema zkoušky v odlupování [23]	24
Obr. 18 Velikost buňky	25
Obr. 19 Rozměrové značení voštinového jádra [17]	25
Obr. 20 Zdvojení stěny buňky při lepení	26
Obr. 22 Schema vyrovnání v řezu	31
Obr. 21 Schema vyrovnání při zkoušce	31
Obr. 23 Záznam tlakové zkoušky voštiny 8.030	32
Obr. 24 Graf středních hodnot tlakové pevnosti s odchylkami po 15 -ti letech stárnutí	36
Obr. 25 Graf pro posouzení opakovaného zatížení	38
Obr. 27 Graf zkoušky v ohybu voštiny 3.080 napříč	40
Obr. 29 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro podélný směr - po 15 -ti letech	44
Obr. 28 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro příčný směr - po 15 -ti letech	44
Obr. 30 Schema měření opravného součinitele pomocí optické metody	45
Obr. 31 Znázornění posunutí jednotlivých bodů pro voštinu 3.080	46
Obr. 32 Graf zkoušky v ohybu voštiny 8.030 napříč (solné prostředí)	47
Obr. 34 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro příčný směr - po 15 -ti letech +40 dnů solná atmosféra	50
Obr. 33 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro podélný směr - po 15 -ti letech +40 dnů solná atmosféra	50
Obr. 35 Graf tlakové pevnosti se zobrazením odchylky – po 15 -ti letech + 30 dnů vlhké teplo	53
Obr. 36 Graf zkoušky v ohybu voštiny 3.080 napříč	54
Obr. 38 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro podélný směr – po 15 -ti letech + 30 dnů vlhké teplo	57
Obr. 37 Graf s výsledky modulu pružnosti ve smyku pro příčný směr – po 15 -ti letech + 30 dnů vlhké teplo	57
Obr. 39 Graf porovnání naměřených dat z měření korekce a stárnutí ve vlhkém teple pro voštinu 3.080 napříč	58
Obr. 40 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 3.080 - napříč	59
Obr. 41 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 3.080 - podél	59
Obr. 42 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 4.060 - napříč	60

Obr. 43 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 4.060 - podél	60
Obr. 44 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 6.040 - napříč	60
Obr. 45 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 6.040 - podél	61
Obr. 46 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 8.030 - napříč	61
Obr. 47 Porovnání velikosti smykového modulu voštiny 8.030 - podél	61

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Srovnání použití druhů jader a potahů [5].....	17
Tab. 2 Odolnost spojů při různém ošetření povrchů adherendů [28]	20
Tab. 3 Odolnost spojů při různém ošetření povrchů adherendů [28]	21
Tab. 4 Pevnost v tlaku [23].....	29
Tab. 5 Modul pružnosti ve smyku zjištěný ohybovou zkouškou [23].....	30
Tab. 6 Maximální pevnosti vzorků voštiny 8.030	31
Tab. 7 Výsledky po tlakové zkoušce	32
Tab. 8 Původní výsledky	32
Tab. 9 Výsledky hypotézy $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$	35
Tab. 10 Výsledky hypotézy $\mu_1 = \mu_2$	36
Tab. 11 Výsledky hypotézy $\mu_1 = \mu_2$ pokračování	36
Tab. 13 Tabulka koeficientů k_s a k_b [13]	38
Tab. 13 Smyková napětí v jádru dle HC Tab. 14 Napětí v potahu dle HC	41
Tab. 15 Maximální síly Tab. 16 Ohybové pevnosti sendviče	41
Tab. 17 Modul pružnosti ve smyku dle Hexcel Composites	41
Tab. 18 Tabulka výpočtů původního modulu pružnosti ve smyku	42
Tab. 19 Tabulka výpočtů modulu pružnosti ve smyku po 15 -ti letech	42
Tab. 24 Tabulka výsledků hypotézy $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$	43
Tab. 25 Výsledky hypotézy $\mu_1 = \mu_2$	43
Tab. 22 Tabulka opravných součinitelů k	46
Tab. 23 Smyková napětí v jádru Tab. 24 Napětí v potahu	47
Tab. 25 Maximální síly Tab. 26 Ohybové pevnosti sendviče	48
Tab. 27 Modul pružnosti ve smyku	48
Tab. 28 Tabulka výpočtů modulu pružnosti ve smyku po 15 -ti letech a stárnutí v solné atmosféře	48
Tab. 33 Tabulka výsledků hypotézy $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$	49
Tab. 30 Tabulka výsledků hypotézy $\mu_1 = \mu_2$	49
Tab. 37 Tabulka výsledků vypočtených	51
Tab. 32 Tlakové pevnosti vzorků voštiny 8.030	51
Tab. 38 Tabulka výsledků hypotézy $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$	52
Tab. 34 Tabulka výsledků hypotézy $\mu_1 = \mu_2$	52
Tab. 35 Tabulka výsledků hypotézy $\mu_1 = \mu_2$ pokračování	52
Tab. 36 Smyková napětí v jádru Tab. 37 Napětí v potahu	54
Tab. 38 Maximální síly Tab. 39 Ohybové pevnosti sendviče	54
Tab. 40 Modul pružnosti ve smyku	55
Tab. 41 Výsledky po 30 -ti denním stárnutí v prostředí vlhkého tepla	55
Tab. 47 Tabulka výsledků hypotézy $\sigma^2_1 = \sigma^2_2$	56
Tab. 43 Tabulka výsledků hypotézy $\mu_1 = \mu_2$	56
Tab. 44 Tabulka výsledných vypočtených smykových modulů a jejich porovnání.....	58

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P-I – Naměřené a vypočtené hodnoty po 15 -ti letech – tlaková zkouška

Příloha P-II – Fotografie vzorků po tlakové zkoušce (po 15 -ti letech stárnutí)

Příloha P-III – Statistické tabulky

Příloha P-IV – Grafy průběhů sil – posunutí stárnuté po 15 -ti letech – ohybová zkouška

Příloha P-V – Umístění a další data vzorků v solné komoře a komoře vlhkého tepla

Příloha P-VI – Grafy průběhů sil – posunutí stárnuté v solné atmosféře – ohybová zkouška

Příloha P-VII – Naměřené a vypočtené hodnoty stárnuté ve vlhkém teple – tlaková zkouška

Příloha P-VIII – Grafy průběhů sil – posunutí stárnuté ve vlhkém teple – ohybová zkouška

Příloha P-IX – Grafy porovnání průběhů zatěžování při korekci a stárnutí ve vlhkém teple

Příloha P-X – Fotografie vzorků po tlakové zkoušce (stárnutí ve vlhkém teple)