



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**STUDIUM ADHEZE LEPENÝCH BALISTICKÝCH
KOMPOZITŮ V ZÁVISLOSTI NA POUŽITÝCH
MATERIÁLECH.**

THE STUDY OF ADHESION OF GLUED BALISTIC COMPOSITES ON THE DEPENDENCE OF MATERIALS USED.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Dobiáš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Šiler, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

Číslo práce: FCH-DIP1169/2017
Ústav: Ústav chemie materiálů
Student: **Bc. Jiří Dobiáš**
Studijní program: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Studijní obor: Chemie, technologie a vlastnosti materiálů
Vedoucí práce: **Ing. Pavel Šiler, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Název diplomové práce:

Studium adheze lepených balistických kompozitů v závislosti na použitých materiálech.

Zadání diplomové práce:

Zjistit pevnost v tahu ve smyku u lepených balistických materiálů (balistická ocel, pogumovaný kevlar, nepogumovaný kevlar, Dyneema, keramika a sklolaminát) v závislosti na použitých lepidlech. Vyhodnotit množství energie potřebné k přetržení těchto spojů.

Termín odevzdání diplomové práce: 7.5.2018

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí diplomové práce.

Bc. Jiří Dobiáš
student(ka)

Ing. Pavel Šiler, Ph.D.
vedoucí práce

prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2018

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo prozkoumat vlastnosti lepených balistických materiálů. Balistické kompozity se lepí hlavně kvůli co největšímu snížení hmotnosti při zachování jejich ochranných vlastností. Na tomto základě byly použity materiály balistická ocel, keramika, pogumovaný kevlar, nepogumovaný kevlar, Dyneema a sklolaminát. Pro lepení bylo použito jednosložkové lepidlo Collano 36. 104 a dvousložkové lepidlo Biresin U1305. Pevnost spoje byla měřena ve smyku při tahovém namáhání. Z těchto výsledků byla dále vypočítána deformační energie.

ABSTRACT

The aim of this work was to investigate the properties of bonded ballistic materials. Ballistic composites are mainly glued to reduce weight while keeping their protective properties. On this basis, the materials used were ballistic steel, ceramics, rubber kevlar, non-gummed kevlar, Dyneema and fiberglass. For bonding used were a one-component adhesive Collano 36.104 and two-component adhesive Biresin U1305. The strength of the joint was measured in shear at tensile loads. From these results, deformation energy was further calculated.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lepidlo, adheze, lepený spoj, pevnost ve smyku, balistický kompozit.

KEYWORDS

Adhesive, adhesion, bonded joint, shear strength, ballistic composite.

DOBIÁŠ, J. *Studium adheze lepených balistických kompozitů v závislosti na použitých materiálech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2018. XY s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Šiler, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
podpis studenta

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Šilerovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a čas, který se mnou strávil při tvorbě celé práce. A také bych chtěl poděkovat celé mé rodině za poskytnutí důležitého zázemí potřebného pro vznik této práce.

Obsah

Úvod.....	7
Teoretická část.....	8
1. Balistické kompozity.....	8
2. Teorie lepení.....	8
2.1. Adheze.....	9
2.2. Koheze.....	10
2.3. Smáčivost.....	10
3. Úprava lepených ploch.....	11
3.1. Čistota povrchu.....	11
3.2. Odmaštění.....	11
3.3. Drsnost.....	11
3.4. Chemické moření.....	12
4. Mechanické namáhání lepených spojů.....	13
4.1. Hookův zákon pro deformaci smykem.....	14
4.2. Deformační energie při smyku.....	14
4.3. Přetvárná práce vnějších sil.....	15
4.4. Hustota deformační energie.....	17
4.5. Namáhání ve smyku lepených spojů.....	18
4.6. Vliv tloušťky lepidel na pevnost lepeného spoje.....	19
5. Druhy lepidel.....	20
5.1. Epoxidová lepidla.....	20
5.2. Kyanoakrylátová lepidla.....	20
5.3. Polyuretanová lepidla.....	20
6. Nanášení lepidla.....	21
7. Měření Mechanických vlastností.....	21
7.1. Univerzální testovací systém – Instron 5985.....	22
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	23
1. Použité materiály.....	23
2. Použité přístroje a zařízení.....	23
3. Postupy při přípravách vzorků a jednotlivých měření.....	23
3.1. Lepidlo Collano 36.104.....	23
3.2. Lepidlo Biresin U1305.....	23
4. Popis použité metody.....	23
VÝSLEDKY A DISKUZE.....	25
1. Pevnosti pro lepidlo Collano 36.104.....	26
1.1. Spojení kovu s ostatními materiály.....	26

1.2. Spojení stejných materiálů.....	26
1.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích...	27
2. Pevnost Biresin® U1305.....	27
2.1. Spojení kovu s ostatními materiály.....	27
2.2. Spojení stejných materiálů.....	28
2.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích...	28
3. Porovnání pevnosti Collano 36.104 vs. Biresin® U1305.....	28
3.1. Spojení kovu s ostatními materiály.....	28
3.2. Spojení stejných materiálů.....	29
3.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích...	30
4. Deformační energie Collano 36.104.....	30
4.1. Spojení kovu s ostatními materiály.....	30
4.2. Spojení stejných materiálů.....	31
4.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích...	31
5. Deformační energie Biresin® U1305.....	32
5.1. Spojení kovu s ostatními materiály.....	32
5.2. Spojení stejných materiálů.....	32
5.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích...	32
6. Porovnání deformační energie Collano 36.104 vs. Biresin® U1305.....	33
6.1. Spojení kovu s ostatními materiály.....	33
6.2. Spojení stejných materiálů.....	34
6.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích...	34
7. Přetvárná práce vnějších sil Collano 36.104.....	35
8. Hustota deformační energie Collano 36.104.....	37
8.1. Spojení kovu s ostatními materiály.....	37
8.2. Spojení stejných materiálů.....	37
8.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích...	38
9. Hustota deformační energie Biresin® U1305.....	38
9.1. Spojení kovu s ostatními materiály.....	38
9.2. Spojení stejných materiálů.....	39
9.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích...	39
10. Porovnání Hustoty deformační energie Collano 36.104 vs. Biresin® U1305.....	39
10.1. Spojení kovu s ostatními materiály.....	39
10.2. Spojení stejných materiálů.....	40
10.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích	41
11. Závěr.....	42
Literatura.....	43

ÚVOD

Moderní lehké balistické zbroje jsou obvykle vícevrstvé konstrukce s nízkou hustotou. Vícevrstvé pancéřové systémy se stále častěji používají pro mnoho vojenských a civilních aplikací, například u lehkých lodí, vozidel, ochrany letounu nebo tělové zbroje [1, 2, 3].

Literatura také zdůrazňuje úlohu lepicí vazby při tvarování ochranných vlastností vícevrstvého pancíře [4, 5]. Například v práci [4] bylo zjištěno, že dvouvrstvá zbroj (oxid hlinitý / hliník) měla optimální tloušťku adhezivní vrstvy (0,3 mm), pro niž je balistická účinnost brnění nejvyšší. V současné době se k lepení jednotlivých vrstev zbroje nejčastěji používají lepidla na bázi epoxidových pryskyřic nebo kyanoakrylátových lepidel [6].

TEORETICKÁ ČÁST

1. BALISTICKÉ KOMPOZITY

V minulosti bylo brnění typicky monolitické a vyrobené z vysoce pevných ocelových plechů. Během posledních několika desetiletí však byla pozorována tendence použít brnění, které poskytují maximální balistickou ochranu při minimální hmotnosti. Mezi mnoha původními koncepty balistických ochranných systémů by měly existovat odlišné vícevrstvé lehké zbroje, které se zdají být nejperspektivnější [1, 7, 2, 3].

Moderní lehké pancéřování je systém několika nebo více než deseti vrstev různých materiálů, kombinovaných nebo oddělených, tvořící takzvanou "vícevrstvou kompozitní strukturu". Typ použitých materiálů, vrstev a jejich tloušťka a konstrukční systém určují ochranné vlastnosti daného brnění. Nejjednodušší konstrukční uspořádání moderního lehkého pancéřování se skládá ze tří vrstev, tj. Z přední keramické vrstvy, umístěné přímo na měkké vrstvě nesené lehkou slitinou nebo vrstvou vlákenného kompozitu (nosná vrstva). [1, 2, 8]. Jako materiály použité pro lehké zbroje byly také testovány nitrid křemíku (Si_3N_4), titanový diborid (TiB_2), nitrid hliníku (AlN), sialon (SiAlON), skla [1, 2, 9] a keramické kompozity zesílené kovem nebo intermetalických fází [10]. Jako nosná vrstva - v případě moderních lehkých výztuh - se obvykle používají vysoce pevnostní elastomery (např. Kaučuk, syntetické elastomery, polymočovina [11, 12]) nebo kovová pěna [13].

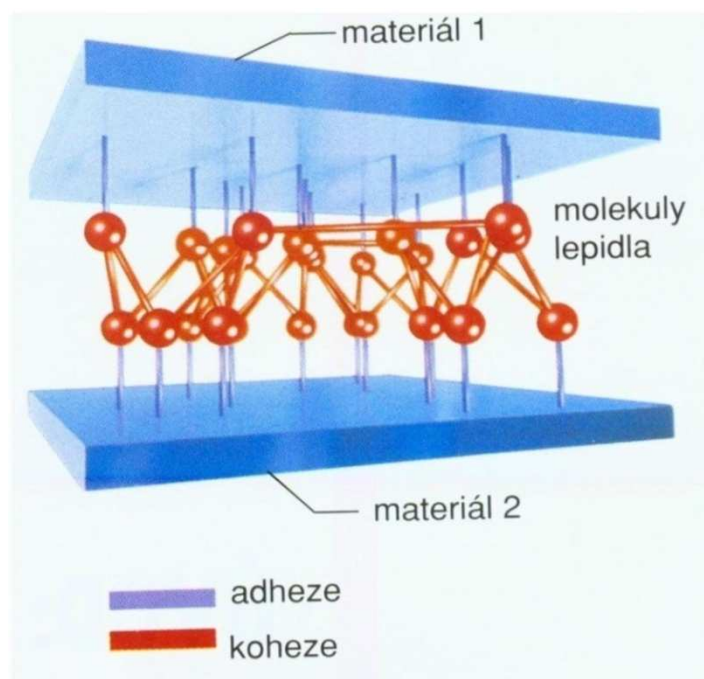
2. TEORIE LEPENÍ

Vyvolání specifické adheze mezi dvěma tuhými materiály, aniž by se použilo lepidlo, by předpokládalo, že spojované plochy budou k sobě přiblíženy na molekulární vzdálenost. Splnění tohoto požadavku je prakticky nemožné [14].

Podstatně snadněji vzniká specifická adheze mezi povrchy pevných a tekutých látek. Kapalina se dobře přizpůsobí nerovnostem povrchu pevné hmoty a dokáže z mikropórů povrchu pevné hmoty vypudit většinu adsorbovaných plynů. Je ovšem nutné, aby kapalina daný povrch dobře smáčela. Zajistíme-li, aby kapalina ztuhla v okamžiku, kdy došlo ke smáčení stykových ploch, stává se lepidlem či pojivem [14].

Pevnost lepeného spoje závisí na čtyřech parametrech [15]:

- na přilnavosti lepidla k lepenému povrchu (adheze) (obr. 1),
- na soudržnosti hmoty lepidla neboli vnitřní pevnosti lepidla (koheze) (obr. 1),
- na smáčivosti lepeného povrchu kapalným lepidlem,
- na pevnosti lepeného materiálu.



Obrázek. 1: Adheze a koheze v lepeném spoji [16]

Výhody lepení [14]:

- lze spojovat stejné nebo různé materiály
- lze konstruovat těsný spoj odolný proti kapalinám a plynům
- lepený spoj zvyšuje tuhost a tlumí vibrace
- v adherendu nejsou žádné koncentrátoři napětí (díry, drážky, atp.)
- lepený spoj nezvyšuje hmotnost souboru
- vysoká pevnost spoje při namáhání ve smyku a rázové pevnosti

Nevýhody lepení [14]:

- nelze zajistit dokonalou čistotu lepených ploch
- jedná se o nerozebíratelné spojení
- citlivost lepeného spoje na namáhání odlupováním a kroucením
- většina lepidel nedolává vysokým teplotám
- časově náročná technologie

2.1. Adheze

Adheze je základní předpoklad úspěšného lepení. Jestliže lepidlo není schopno dostatečně pevně přilnout k materiálu, spoj nedrží a dochází k rozlepení na rozhraní lepidlo – lepený materiál. V tomto případě je vnitřní soudržnost lepidla (koheze) i vlastní pevnost materiálu vyšší než přilnavost (adheze). Na to proč vznikají adhezní síly, existují minimálně čtyři teoretické modely vazby mezi lepidlem a lepeným povrchem [15]:

- chemická vazba,
- mechanická vazba,
- elektrostatická vazba,
- difuzní,
- molekulová (adsorpční) vazba.

Chemická teorie adheze vychází z představy, že síly působící na fázovém rozhraní adherent/adhezní film mají charakter chemických (kovalentních) vazeb, které jsou typické vysokým energetickým obsahem. Látky, které v takových případech zprostředkovávají adhezi, se označují jako promotory adheze [17].

Mechanická teorie vychází z představy, že po proniknutí kapalného adheziva do trhlin a kavit lepeného povrchu, dojde po zatuhnutí adheziva k jeho „zaklínění“ v povrchu adherentu.

Uplatňuje se tedy jen u členitých nebo porézních povrchů. Při lepení leštěných hladkých ploch je mechanická vazba zanedbatelná [17].

Teorie difuzní vychází v podstatě z teorie mechanické s tím, že místo úrovně mikroskopické uvažuje úroveň molekulární. Jejím základem byly studie autoadheze polymerů. V takových případech uplatňuje interdifuze makromolekulárních segmentů přes fázové rozhraní tak výrazně, že vede k vymizení fázového rozhraní. Pokud jsou makromolekulární segmenty různých polymerů dostatečně pohyblivé a vzájemně kompatibilní (rozpustné) může se interdifuze uplatnit i v případech rozdílných polymerů [17].

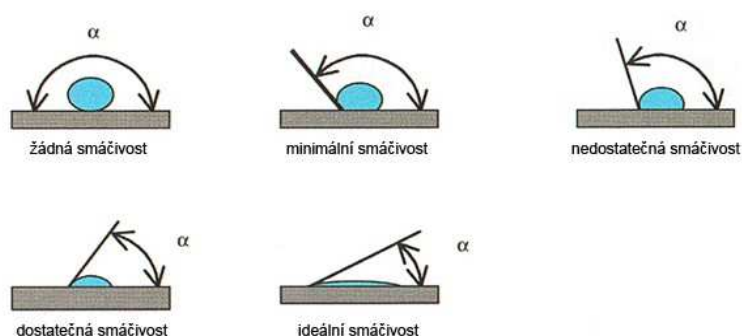
Dnes nejvíce přijímaná *adsorpční teorie* adheze vychází z analogie jevu smáčení, adsorpce a adheze. Za nejvýznamnější síly, působící v lepeném spoji přes fázové rozhraní pokládá síly Van der Waalsovské, které vzhledem k jejich universálnímu charakteru a četnosti považuje, přes poměrně nízký energetický obsah za postačující k dosažení dobré pevnosti adhezního spojení. Příčina malé pevnosti adhezního spoje je spatřována především v omezeném kontaktu adherentu a adheziva. Adheziva se vždy aplikují v kapalně formě a podmínka dosažení dobrého kontaktu s adherentem proto úzce souvisí s dokonalostí smáčení tohoto povrchu kapalným adhezivem [17].

2.2. Koheze

Koheze představuje vlastní pevnost vrstvy lepidla. Jestliže se lepený spoj roztáhne ve vrstvě lepidla, znamená to, že adheze i pevnost lepeného materiálu je vyšší než koheze. Kohezni pevnost závisí na charakteru lepidla (dvousložkové epoxidy mají vysokou kohezi; měkké akryláty pro výrobu trvale lepivých samolepících etiket mají nízkou kohezi) a na tepelném namáhání lepeného spoje (většina jednosložkových lepidel jsou termoplasty – měknou při zvyšování teploty) [15].

2.3. Smáčivost

Je známé chování kapalin vylitých na vodorovný povrch různých materiálů. Měří se tzv. okrajovým úhlem buď z fotografie, nebo zvětšené projekce tvaru kapky dané kapaliny na lepeném povrchu v místě styku. Teoreticky bylo zjištěno, že má-li kapalina pevnou látku smáčet, což je i jednou z podmínek dobrých výsledků lepení, musí být její povrchové napětí menší než povrchové napětí smáčené hmoty. Je-li naopak povrchové napětí lepidla vyšší než napětí povrchu, lepidlo se nerozlije a kapka lepidla se drží na povrchu jako kulička. Nesmáčí-li lepidlo lepený povrch, adheze bude slabá a lepený spoj se rozpadne. Současně se požaduje, aby se okrajový úhel mezi lepidlem a lepeným povrchem rovnal 30° nebo byl menší [14].

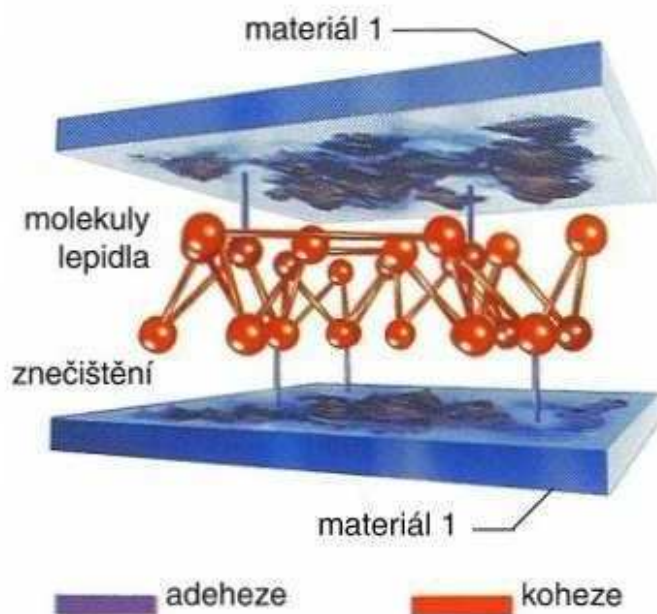


Obrázek. 2: Smáčivost lepidel [18]

3. ÚPRAVA LEPENÝCH PLOCH

3.1. Čistota povrchu

Aby bylo dosaženo optimální pevnosti spoje, předpokládá se mimo jiné absolutní kontakt lepidla s povrchem lepené hmoty. Pokud se na povrchu lepeného materiálu vyskytují nečistoty, lepidlo nesmáčí povrch lepeného materiálu, ale jen povrch nečistoty [14].



Obrázek 3: Znečištěný lepený povrch [16]

3.2. Odmaštění

Provádí se těkavými organickými rozpouštědly, nebo vodnými roztoky saponátů. Podmínkou volby odmašťovacího prostředku je nerozpustnost upravované hmoty [14].

Při úpravě jednotlivých spojů je možné zejména menší plochy odmašťovat vatovými tampóny smáčenými v rozpouštědle. Ve větším měřítku se odmašťování provádí rozpouštědly systémem dvou lázní (nečisté a oplachovací) nebo v parách vroucích rozpouštědla, které je sice méně bezpečné, avšak zaručuje dobrý výsledek [14].

Odmašťování pomocí teplých vodných roztoků saponátů je přirozeně nejlepší z hlediska bezpečnosti i ekonomického. Používá se jej všude tam, kde je lepený materiál citlivý vůči organickým rozpouštědlům nebo kde by zbytky par rozpouštědel zachycené v mikropórech povrchu mohly nepříznivě ovlivnit pevnost spoje [14].

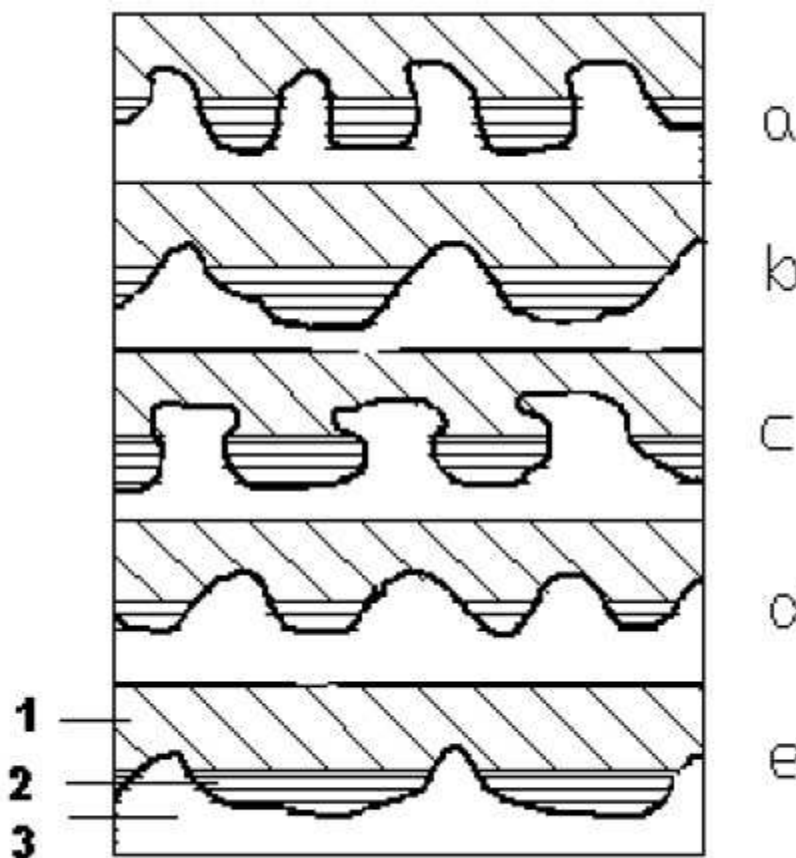
3.3. Drsnost

Každá styčná plocha představuje 3 druhy povrchu [19]:

- geometrický* povrch daný konstrukčními rozměry spoje,
- mikropovrch* tj. teoreticky možná styčná plocha, zahrnující veškeré nerovnosti a póry,
- účinný povrch* tj. část mikropovrchu, skutečně smáčená lepidlem.

Geometrický povrch, zahrnující délkové rozměry lepené plochy a tloušťkové tolerance vytvářející charakteristiku souběžnosti spojovaných ploch, ovlivňuje především stejnoměrnost rozvrstvení lepidla ve spáře. Na účinný styk lepidla s povrchem má při dané viskozitě lepidla vliv tvar nerovností mikropovrchu. Podle Bruana jde o pět typů nerovností (obr. 4) [20].

Z výpočtů smáčivosti ve vztahu k hloubce a průměru nerovnosti bylo zjištěno, že se zmenšujícím se průměrem a hloubkou nerovností typu *d* dochází postupně až k samovolné adhezi i bez použití lepidla. Jiné nerovnosti povrchu, např. *a* a *g*, jsou naopak pro lepení nevýhodné, protože lepidlo jen obtížně proniká do prohlubní naplněných plynem a nesmáčí větší volnou část mikropovrchu. U miskovité nerovnosti typu *e*, jejíž výskyt se předpokládá na leštěném povrchu, je tomu podobně. Lze tedy říci, že jen tvarově výhodné zdrsnění povrchu může mít příznivý vliv na pevnost spoje. Jako optimální hloubka zdrsnění se zpravidla uvádí 1 až 6 μm . Přitom lepidla tvrzená za normální teploty jsou na tvar povrchu citlivější než lepidla vytvrzovaná za horka [19].



Obrázek 4: Pět typů nerovností podle deBruyna [20].

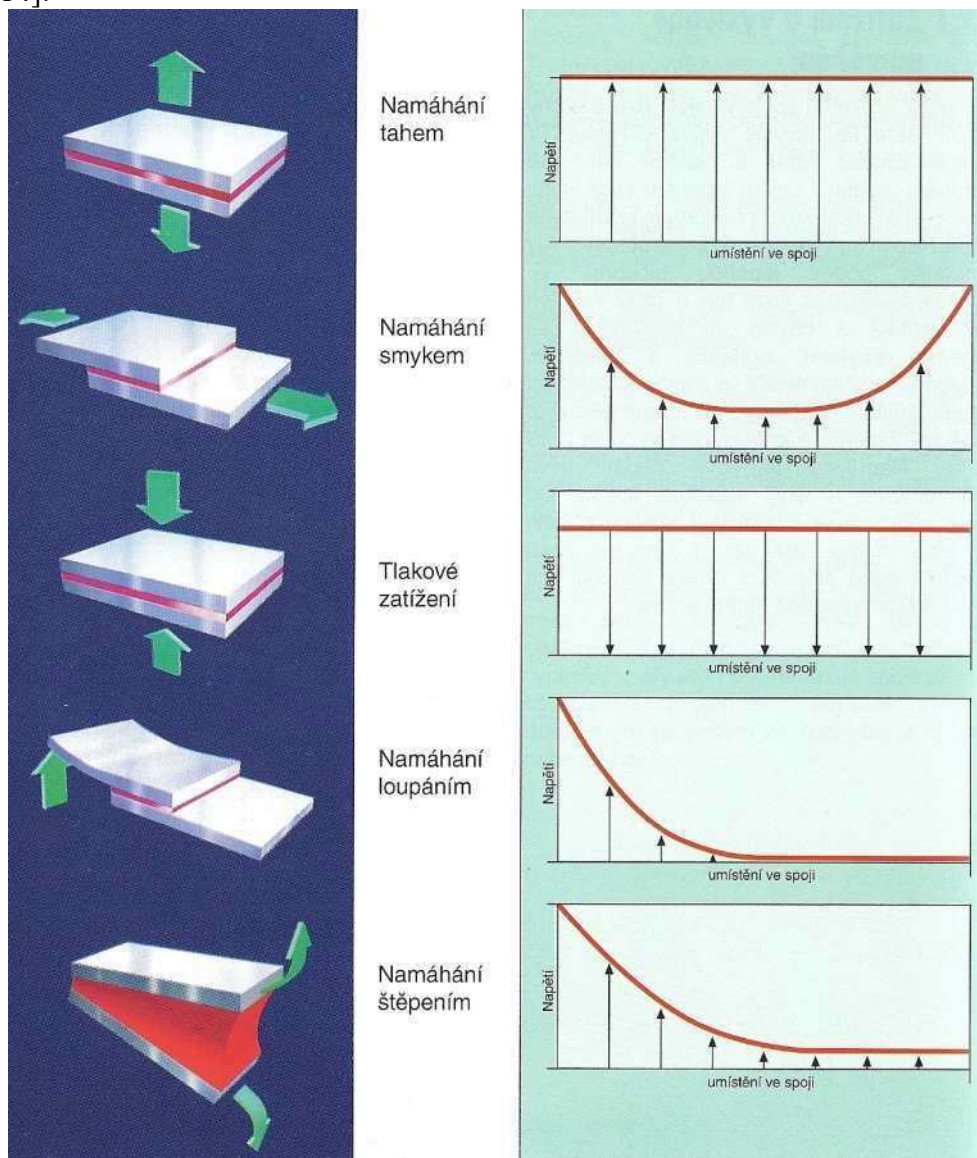
a – válcová nerovnost, *b* – kónická otevřená nerovnost,
c – kónická uzavřená nerovnost, *d* – kónická plochá nerovnost,
e – miskovitá nerovnost,
1 – geometrický povrch, 2 – mikropovrch, 3 – účinný povrch

3.4. Chemické moření

Kovy, sklo, porcelán a některé druhy plastických hmot, např. polyolefiny a polyamidy, se vyznačují tím, že v původním stavu nejsou dobře lepitelné. Ani při použití jinak osvědčených lepidel nedosahují spoje přiměřené pevnosti spojovaného materiálu. Zdrsnění ani odmaštění spojovaných ploch nestačí uvedený nedostatek odstranit. Z různých metod, které byly navrženy zlepšení adhezních vlastností spojovaných povrchů, se nejvíce osvědčili metody spočívající v aktivaci pomocí roztoků chemikálií [14].

4. MECHANICKÉ NAMÁHÁNÍ LEPENÝCH SPOJŮ

Lepený spoj bývá nejčastěji mechanicky namáhán v tahu, tlaku, smyku, odlupováním, rázovou pevností, kroucením apod. Příznivé namáhání lepených spojů je v tahu, tlaku a smyku. Zato na namáhání v odlupování a kroucení je lepený spoj citlivý. Tato namáhání se soustřeďují jen do určitých míst spoje, kde dochází k lokálnímu přetížení a poškození filmu lepidla [14].



Obrázek 5: Mechanické namáhání lepených spojů [16]

4.1. Hookův zákon pro deformaci smykem

Nechť na kvádr o rozměrech a, b, c působí ve stěně bc ve směru hrany b síla F . Protilehlá stěna bc nechť je upevněna. Pak nastane zkosení hranolu, přičemž posunutí horní stěny označíme Δs . Toto posunutí je přímo úměrné působící síle, délce hrany a a nepřímo úměrné plošnému obsahu $S = bc$ [21]:

$$\Delta s = \frac{Fa}{GS}. \quad (1)$$

Zde G je modul pružnosti ve smyku. Vztah (1) pro výpočet prodloužení při tahu se nazývá Hookův zákon pro smyk. [21]

Vztah (1) dále upravíme. Pro malé deformace můžeme psát

$$\frac{\Delta s}{a} = \operatorname{tg} \gamma \approx \gamma, \quad (2)$$

kde γ je zkos. Tato veličina je úhlové přetvoření – vyjadřuje úhel, o který při deformaci vzroste úhel $\pi/2$ mezi úsečkami BA, BC . Dále je zřejmé, že ve výrazu (1) je $F/S = \tau$ tečné napětí. Pak můžeme Hookův zákon pro smyk psát v jednoduchém tvaru

$$\tau = G\gamma, \quad (3)$$

který je analogický vztahu $\sigma = E\varepsilon$ (Hookův zákon pro tah/tlak) [21].

Ke dvěma materiálovým konstantám E, μ , které pružnou látku charakterizují při tahové/tlakové deformaci, přistupuje u smykové deformace konstanta G – modul pružnosti ve smyku. Mechanika pružného kontinua ukazuje, že mezi těmito konstantami existuje jednoznačný vztah [21]

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}. \quad (4)$$

4.2. Deformační energie při smyku

Protože se kvádr nachází ve statické rovnováze, projeví se práce vykonaná vnějšími silami při jeho deformaci přírůstkem jeho potenciální energie; v tomto případě deformační energie při smyku. Vypočteme tedy deformační práci ze stavu bez deformace ($x = 0$) do stavu s deformací $x = \Delta s$. V obecné poloze (při protažení x) má vnější síla velikost $Fx = GSx/a$ a při protažení o délku dx vykoná elementární práci [21]

$$dW = F_x dx = \frac{GS}{a} x dx. \quad (5)$$

Celková deformační práce při protažení o Δs je [22].

$$W = \frac{GS}{a} \int_0^{\Delta a} x dx = \frac{GS}{a} \left[\frac{x^2}{2} \right]_0^{\Delta a} = \frac{GS}{2a} (\Delta a)^2 = \frac{1}{2} F \Delta a = \frac{F^2 a}{2GS}. \quad (6)$$

Zde jsme práci vyjádřili ještě užitím koncové velikosti síly F a prodloužení podle vztahu (2). Zavedeme-li do (6) zkos γ a tečné napětí τ , dostaneme pro deformační práci a tudíž i pro deformační energii U výraz

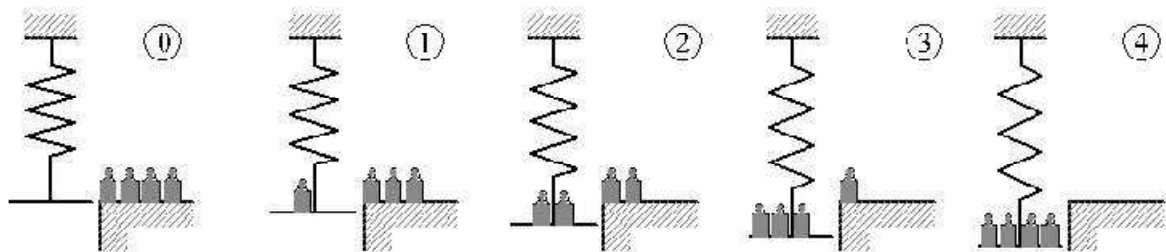
$$W = U = \frac{\tau^2}{2G} aS \quad (7)$$

kde jsme využili vztahu (1), přičemž $aS = V$ je objem kvádrů. Pro hustotu deformační energie při smyku dostaneme [21]

$$u_s = \frac{U}{V} = \frac{\tau^2}{2G} = \frac{\gamma\tau}{2} = \frac{\gamma^2 G}{2} \quad (8)$$

4.3. Přetvárná práce vnějších sil

Proměnné vnější síly konají na poddajném tělese práci. Z fyziky víme, že mechanická práce se vypočte jako součin síly a dráhy, na které síla působí. Problém v případě poddajných těles spočívá v závislosti síly na deformaci tělesa. Na obrázku 6 je proces zatížení pružiny rozfázován do čtyř kroků [22].



Obrázek 6: Postup zatěžování [22]

Mechanickou práci můžeme, za předpokladu čtyř stejných zatěžovacích kroků, vyjádřit pro zatěžovací krok 1 jako

$$L_{e,1} = F_1 u_1 = \frac{1}{4} F \frac{1}{4} u = \frac{1}{16} Fu, \quad (9)$$

kde F a u jsou konečné hodnoty působící síly a posunu [22].

Ve druhém kroku můžeme psát

$$L_{e,2} = F_1 u_1 + F_1 + F_2 u_2 = \frac{1}{4} F \frac{1}{4} u + \frac{2}{4} F \frac{1}{4} u = \frac{3}{16} Fu \quad (10)$$

Pro třetí krok obdobně dostaneme

$$L_{e,3} = F_1 u_1 + F_1 + F_2 u_2 + F_1 + F_2 + F_3 u_3 = \frac{1}{4} F \frac{1}{4} u + \frac{2}{4} F \frac{1}{4} u + \frac{3}{4} F \frac{1}{4} u = \frac{3}{8} Fu \quad (11)$$

A obdobně ve čtvrtém, posledním, kroku [22]:

$$\begin{aligned} L_{e,4} &= F_1 u_1 + F_1 + F_2 u_2 + F_1 + F_2 + F_3 u_3 + F_1 + F_2 + F_3 + F_4 u_4 \\ &= \frac{1}{4} F \frac{1}{4} u + \frac{2}{4} F \frac{1}{4} u + \frac{3}{4} F \frac{1}{4} u + \frac{4}{4} F \frac{1}{4} u = \frac{10}{16} Fu = 0,625 Fu. \end{aligned} \quad (12)$$

Obecně můžeme psát pro zatěžovací proces rozdělený na n částí

$$L_{e,n} = \frac{\sum_{i=1}^n i}{n^2} Fu = \frac{\frac{1}{2} n(n+1)}{n^2} Fu, \quad (13)$$

potom pro 100 částí dostaneme

$$L_{e,100} = 0,505 Fu \quad (14)$$

a pro 1000 částí [22].

$$L_{e,1000} = 0,5005 Fu \quad (15)$$

V případě $n = \infty$ bude

$$L_e = \frac{1}{2}Fu. \quad (16)$$

V předchozí úvaze jsme vyjadřovali velikost aktuálně působící síly v závislosti na posunu, tj. síla záležela na fázi posunu[22].

$$F = ku, \quad (17)$$

kde k je tuhost pružiny vyjádřená jednotkou [N/m]. Komplikovaný předchozí výpočet můžeme potom nahradit integrálem [22]

$$L_e = \int_0^u F u \, du. \quad (18)$$

Proveďme nahrazení síly F pomocí vztahu (9) a dostaneme

$$L_e = \int_0^u k u \, du = \frac{1}{2}k[u^2]_0^u = \frac{1}{2}ku^2 \quad (19)$$

Vyjádříme-li ze vztahu (9) posun a dosadíme do (11), dostaneme rovnici (8) [22].

Učinně nyní obrácenou úvahu a pokusme se vyjádřit práci, která se musí vykonat při zatěžovacím procesu při posunu závaží na snižující se plošinu. Při posunu prvního závaží vykonáme nulovou práci, protože jsme celou tíhu závaží přisoudili pružině [22]

$$L_{e,1}^* = u_1 \cdot 0 = \frac{1}{4}u \cdot 0 = 0. \quad (20)$$

Ve druhém kroku je třeba posunout druhé závaží o u_2 .

$$L_{e,2}^* = L_{e,1}^* + \frac{1}{4}u \frac{1}{4}F = \frac{1}{16}uF. \quad (21)$$

Třetí závaží posunujeme o $0,5u$ a práci vyjádříme

$$L_{e,3}^* = L_{e,2}^* + \frac{2}{4}u \frac{1}{4}F = \frac{3}{16}uF. \quad (22)$$

Celková komplementární práce bude

$$L_{e,4}^* = L_{e,3}^* + \frac{3}{4}u \frac{1}{4}F = \frac{6}{16}uF \quad (23)$$

Celková práce, vyjádřená jako součet přetvárné a komplementární přetvárné práce, bude

$$L_{e,tot} = L_e + L_e^* = \frac{10}{16}Fu + \frac{6}{16}Fu = Fu, \quad (24)$$

což je celková mechanická práce síly.

Pro n stejných částí můžeme psát

$$L_e^* = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} i}{n^2} uF = \frac{n \cdot 0 + n-1}{n^2} uF = \frac{n^2 - n}{2n^2} uF, \quad (25)$$

Pro $n = 100$ dostaneme

$$L_{e,100}^* = 0,495uF \quad (26)$$

a pro $n = 1000$

$$L_{e,1000}^* = 0,4995uF. \quad (27)$$

Pro $n = \infty$

$$L_{e,\infty}^* = 0,5uF = L_{e,\infty}. \quad (28)$$

Doplňkovou přetvárnou práce vnějších sil můžeme napsat integrálně

$$L_e^* = \int_0^F u F dF. \quad (29)$$

Zde je vyjádřen posun jako funkce aktuálně působící síly, čímž se doplňková práce liší od přetvárné práce. Dosadíme-li za posun ze vzorce (9), dostaneme [22]

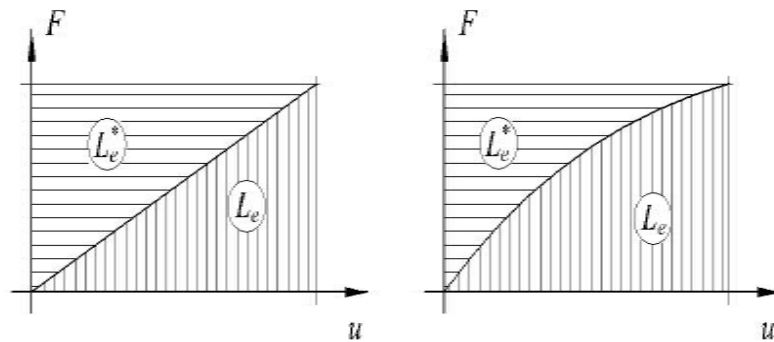
$$L_e^* = \int_0^F \frac{F}{k} dF = \frac{1}{2k} [F^2]_0^F = \frac{1}{2} \frac{F^2}{k}. \quad (30)$$

Po zpětném dosazení z fyzikální podmínky (9) dostaneme vztah totožný s (8) [22].

Pro lineárně pružný materiál platí rovnost [22]

$$L_e = L_e^*. \quad (31)$$

Pro nelineární chování materiálů tato rovnost zachována není, jak plyne z obrázku 7. Přetvárná a komplementární práce sil mají též charakter ploch, vyšrafovaných na stejném obrázku [22].



Obrázek 7: Přetvárná práce vnějších sil pro lineárně pružný a nepružný materiál [22]

4.4. Hustota deformační energie

K vysvětlení pojmu deformační energie budeme uvažovat případ prostého tahu a kvazistatické zatěžování, pak lze zanedbat kinetickou složku energie. Veškerá práce vnější síly W [J] se přemění v deformační energii (tj. v potenciální energii deformace) U [J] akumulovanou v tělese. Pro výslednou práci na diferenciálu objemu $dx dy dz = dV$ pak platí [22]

$$dW = dU = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon dx dy dz = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon dV. \quad (32)$$

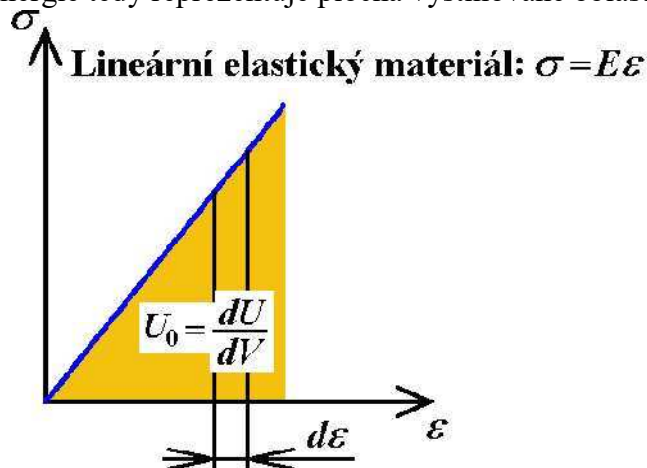
Hustota deformační energie je pak deformační energie vztažená na jednotkový objem

$$U_0 = \frac{dU}{dV} = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon. \quad (33)$$

Pro lineárně pružný materiál, lze po aplikaci Hookova zákona psát

$$U_0 = \int_0^\varepsilon E\varepsilon d\varepsilon = \frac{E\varepsilon^2}{2} = \frac{\sigma\varepsilon}{2} = \frac{\sigma^2}{2E}. \quad (34)$$

Hustotu deformační energie tedy reprezentuje plocha vystínované oblasti v obrázku 8 [22].



Obrázek 8: Znárodnění hustoty deformační energie v tahovém diagramu [22]

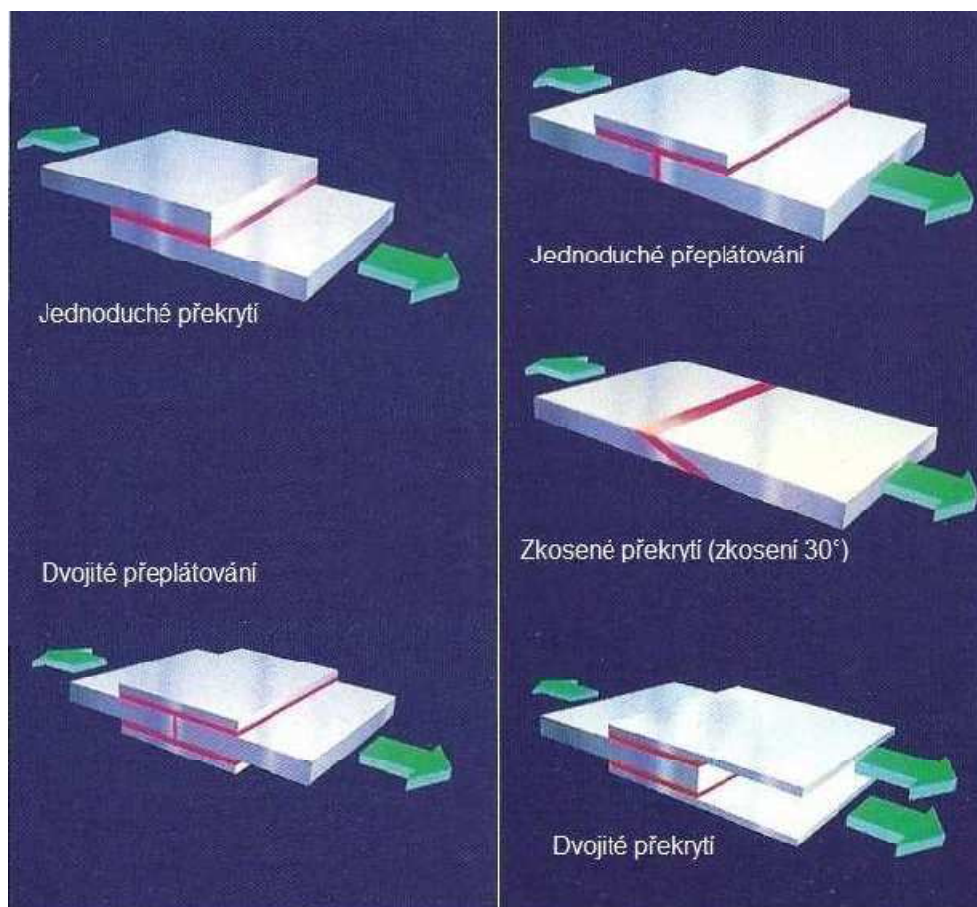
4.5. Namáhání ve smyku lepených spojů

Pevnost lepených spojů ve smyku při zatěžování v tahu. Zkouška spočívá v namáhání přeplátovaného spoje statickým tahem ve směru podélné osy do porušení vzorku. Při zatížení může podle druhu materiálu zkušební tělesa dojít k vychýlení nebo deformaci roviny lepeného spoje (obrázek 9). Například při hodnocení pevnosti spoje u plastů se zkušební těleso protahuje a spoj se vychyluje z osy namáhání. Při různých modulech pružnosti filmu lepidla a plastických hmot pak vzniká nerovnoměrné rozložení sil ve spoji a naměřené hodnoty pevnosti jsou zkreslené. Zjištěné hodnoty nelze proto v těchto případech považovat za čistou pevnost ve smyku, i když je tak uváděna [14].



Obrázek 9: Deformace jednostranně přeplátovaných spojů v důsledku excentrického působení sil [23]

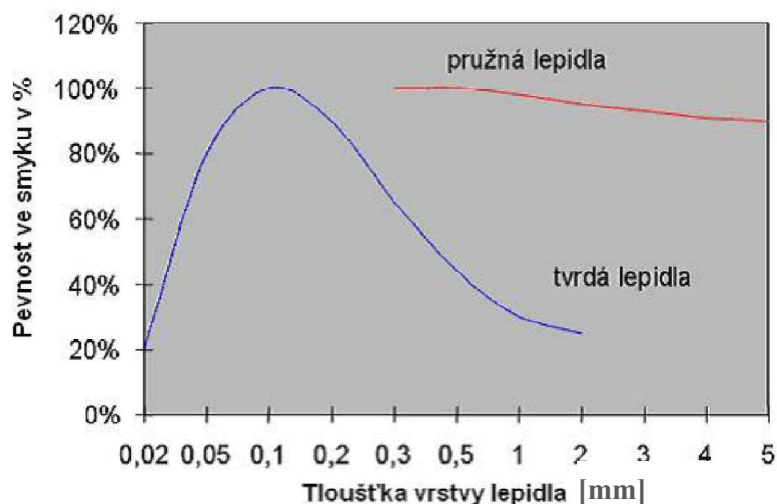
Proto byly pro zkoušení spojů plastů navrženy různé úpravy, které mají zajistit působení smykové síly ve směru osy lepeného spoje [14]:



Obrázek 10: Úpravy pro odstranění excentrického působení zatěžujících sil [16]

4.6. Vliv tloušťky lepidel na pevnost lepeného spoje

Důležitým faktorem, který ovlivňuje pevnost lepeného souboru, je tloušťka vrstvy lepidla. Teoreticky lze stanovit, že optimální tloušťka vrstvy lepidla se pohybuje mezi 0,05 až 0,25 mm (obrázek 11). V praxi je to jinak. Každé lepidlo má různou maximální pevnost při různé tloušťce lepidla za stejných podmínek. Nelze tedy jednoznačně stanovit optimální vrstvu lepidla, která by byla vhodná pro všechna lepidla. Tato vrstva však obvykle leží v intervalu teoretických hodnot. U tmelů a pružných lepidel je hodnota tloušťky vrstvy vyšší (obrázek 11). Doporučená tloušťka lepené vrstvy každého lepidla je uvedena v návodech výrobcem. Pokud se nedodrží předepsaná hodnota vrstvy lepidla, může dojít k poklesu pevnosti a tím k ovlivnění lepeného spoje. Při aplikaci řídkých lepidel, kde by mohlo dojít k vytlačení lepicí směsi, se používají pro dodržení konstantní tloušťky lepidla distanční drátky [14, 24]



Obrázek 11: Závislost pevnosti ve smyku na tloušťce vrstvy lepidla [25]

5. DRUHY LEPIDEL

5.1. Epoxidová lepidla

Epoxidová lepidla se vyrábějí jako jednosložková, dvousložková či vícesložková. Těmito lepidly se lepí pouze tvrdé materiály, protože po ztuhnutí epoxidu se z něj stává tvrdý a křehký materiál. Z důvodu vysoké pevnosti (až 300 kg/cm²) se používají tam, kde je namáhání na tah a smyk. Pracovní teplota těchto lepidel se pohybuje mezi -60 °C až +150 °C. Tato lepidla se vyskytují v různých barevných modifikacích. Dvousložková lepidla mohou být čirá, nažloutlá nebo tmavě zabarvená (např. epoxid s ocelovým práškem nebo jiným kovovým plnivem, které výrazně zvyšuje tepelnou odolnost). Tato dvousložková lepidla mají vysokou pevnost. Doba na zpracování lepených dílů, během které lze se spojem manipulovat, než spoj ztuhne, se pohybuje od 3 do několika desítek minut. Maximální pevnost ve smyku je v případě adhezního spoje mezi ocelovými díly až 40 MPa. Pracovní teplota jednosložkových epoxidových lepidel je -55 °C až +200 °C s pevností v tahu 44 MPa. Vyznačují se vysokou odolností vůči odlupování a vysokou pevností ve smyku až 30 MPa [26].

5.2. Kyanoakrylátová lepidla

Kyanoakryláty je třída organických sloučenin označovaných jako rychle tvrdnoucí nebo sekundová lepidla. Vytvrzují se vzdušnou vlhkostí a člení se na nízkoviskozní, středněviskozní, vysokoviskozní, gelové a pro porézní a kyselé povrchy. Nejvyšší pevnosti se dosáhne lepením neporézních materiálů. Jejich popularita spočívá v jejich univerzálnosti použití. Rychlost polymerizace je ovlivněna i množstvím naneseného lepidla a pohybuje se do desítek sekund. Vzniká spoj s vysokou pevností, odolný proti vodě, alkoholu, benzinům, olejům, UV záření a vlivům počasí. Slepovat můžeme: kovy, většinu umělých hmot, sklo, keramiku, gumu, kůži, porcelán, dřevo. Lepené součásti mohou být tvrdé, měkké, porézní i neporézní. V případě savých materiálů proniká lepidlo do hloubky materiálu [26].

5.3. Polyuretanová lepidla

Těmito lepidly se vytváří trvale pružný spoj. Spojovat by se měly především nesavé materiály jako je plast, kov, sklo, beton nebo dřevo. Při lepení porézních materiálů se lepidlo nanese pouze na jeden díl, u neporézních na oba díly. Odolává horké vodě, čistícím prostředkům, ředěným louchům, i kyselinám. Doba zpracovatelnosti je přibližně 10 až 15 minut a jsou zpracovatelná i za nízkých teplot. Lepené spoje jsou pevné, pružné a odolné vůči dynamickému namáhání. Teplota, při které má lepený spoj vyhovující vlastnosti se pohybuje mezi -20 °C a +90 °C. Výhodou je jejich nízká cena [26].

6. NANÁŠENÍ LEPIDLA

Rovnoměrnost, souvislost a správná tloušťka nánosu lepidla na jedné nebo obou styčných plochách spoje jsou prvním předpokladem úspěšného lepení. O tom, zda má být nános jednostranný nebo oboustranný, rozhoduje druh lepidla a celkový charakter spoje. Obecně platí, že rozpouštědlová, rychle schnoucí lepidla, jejichž tuhnutí postupuje v důsledku odpařování nebo difuze rozpouštědla do podkladu z jedné nebo obou hladin filmu, se musí nanášet na obě lepené plochy. Reaktivní lepidla, která tuhnou v důsledku reakce v celé hmotě současně, lze nanášet jednostranně. Nános lepidla musí stačit k vytvoření přiměřeného filmu lepidla ve spáře, s mírným krůpějovým přetokem. U tekutých lepidel s celkovým nánosem v mezích od 100 do 300 g/m² lepené plochy. Při zpracovávání lepivých tmelů může být spotřeba ještě větší. Některé druhy lepidel jsou velmi citlivé na tloušťku filmu. Například močovinová lepidla, která se po vytvrzení vyznačují značným vnitřním pnutím, vyžadují relativně nejtenčí nános. Naopak u lepidel epoxidových má být zachována minimální tloušťka filmu 0,2 mm. Optimální dodržení tloušťky umožňují tzv. lepicí fólie, tj. teplem aktivovatelná lepidla nanesená na jemném celulózovém nosiči. Možnost dodržení předepsané tloušťky nánosu ovšem závisí i na kvalitě a pórovitosti podkladu. Při jednostranném nánosu se lepidlo obvykle nanáší na materiál s horšími adhezními vlastnostmi nebo na plochu méně pórovitou. Slepují-li se hmoty velmi pórovité, do nichž se lepidlo snadno vsakuje, musí se lepidlo buď zahustit, nebo se musí nános opakovat. Při lepení voštinových konstrukcí se lepidlo zpravidla na voštinu nanáší. Spojují-li se pěnové hmoty s jinou vrstvou, např. s krycí fólií, nanáší se lepidlo podle potřeby buď na pěnu, má-li být spoj prodyšný, nebo na fólii, postačí-li spoj neprodyšný. Postup závisí na druhu spojovaných materiálů, na konstrukci spoje, na formě lepidla a počtu resp. Metráži spojovaných ploch. Jsou v zásadě jen dvě alternativy: tekutá lze nanášet ručně, nebo vhodným nanášecím zařízením. [14]

7. MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Mechanické vlastnosti kvantitativně vyhodnocují chování materiálu pod vlivem vnějších mechanických sil. Základní mechanické vlastnosti jsou: pružnost, pevnost, plasticita a houževnatost. Další vlastnosti, jako je tvrdost, odolnost proti únavě nebo odolnost proti povětrnostním vlivům, jsou považovány za odvozené od těchto základních vlastností za určitých stresových podmínek[27].

7.1. Univerzální testovací systém – Instron 5985



Obrázek 12: Univerzální testovací systém – Instron 5985 [27].

- Statické testovací systémy, které provádějí testování v tahu a kompresi; a také provádějí testy smyku, ohýbání, odloupání, trhání, cyklické a ohybové zkoušky,
- vybavený rámem s nosností 250 kN,
- vertikální zkušební prostor 1430 mm, horizontální zkušební prostor 570 mm,
- vybavený zkušební hlavou 10 a 250 kN,
- rychlostní rozsah 0,00005 až 1 016 mm·min⁻¹,
- vybavené pneumatickými klínovými úchytkami, lze umístit kruhové vzorky do průměru 60 mm a plochých vzorků o tloušťce až 70 mm
- dostupné axiální a příčné kotevní extenzometry umožňují měřit obě pozitivní a negativní napětí [27].

Standardní využití [27]:

- statické měření vzorků v ohybové pevnosti, pevnosti v tlaku, ...,
- testování materiálů s vysokou pevností, jako jsou letecké kompozity, kovové slitiny a krystalické polymery,
- stanovení pevnosti materiálu, Youngův modul, mez kluzu, elastické a plastické deformace, ...,
- pomocí extenzometrů během měření pro přesný popis tahových křivek.

Toto zařízení se obvykle používá pro [27]:

- měření vysokopevnostních anorganických materiálů v ohybové pevnosti a pevnosti v tlaku,
- zkoušky tahu připravených kompozitů (dog bone),
- testování průmyslově vyráběných výrobků při různých zatíženích a podmínkách měření,
- testování vtačování, testování odtržení, testování adheze, ...

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

1. POUŽITÉ MATERIÁLY

Lepený materiál

- Balistická ocel
- Kevlar
- Pogumovaný kevlar
- Dyneema
- Balistická keramika
- Balistický sklolaminát

Lepidla

- Collano 36.104
- Biresin® U1305

2. POUŽITÉ PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ

- Univerzální testovací systém – Instron 5985

3. POSTUPY PŘI PŘÍPRAVÁCH VZORKŮ A JEDNOTLIVÝCH MĚŘENÍ

U všech vzorků bylo potřeba nejdříve povrch důkladně očistit acetonem. Lepidla byla vždy nanesena ve stejné vrstvě na jednu z lepených ploch o velikosti 5 x 5 cm dle normy ČSN EN 1465 kromě keramiky, kde bylo použito jiného přeplátování a testovaný spoj měl velikost 2,5 x 5 cm, ale přeplátování bylo provedeno z obou stran (dvojitě přeplátování). Ukázka měřeného vzorku je na obrázku 13.



Obrázek 13: Ukázka měřeného vzorku.

3.1. Lepidlo Collano 36.104

Lepidlo ve formě filmu bylo vloženo mezi lepené plochy. Bylo přiloženo závaží 0,5 kg a vše bylo vloženo do sušárny na 120 °C. Po 10 minutách byl vzorek vyjmut a poté byl nechán volně tvrdnout pomocí vzdušné vlhkosti po dobu 7 dní

3.2. Lepidlo Biresin U1305

Nejdříve byla namíchána pryskyřice s tvrdidlem v poměru 100:60. Vzniklá směs byla nanesena a rozetřena na jednu z lepených ploch. Druhá plocha byla ihned přiložena a zatížena 0,5 kg závažím, neboť doba zpracování je přibližně 15–20 min. Takto připravené vzorky byly nechány volně tvrdnout pomocí vzdušné vlhkosti po dobu 7 dní.

4. POPIS POUŽITÉ METODY

Pro měření adheze byla vybrána metoda měření dle normy ČSN EN 1465 - Lepidla - Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav. Měření bylo provedeno na univerzálním testovacím stroji Instron 5985 na základě parametrů uvedených v ČSN EN 1465. Způsob měření a uchycení je znázorněn na obr. 14,



Obrázek 14: Měření při porušení spoje (vlevo) a odtrhnutí (vpravo).

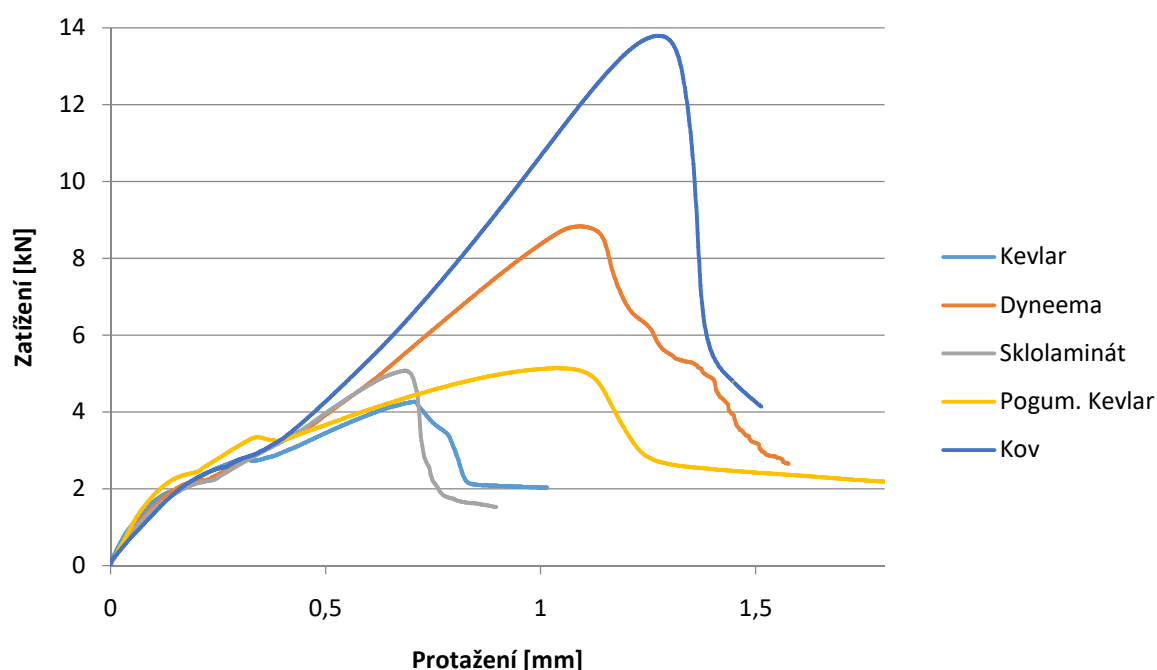
VÝSLEDKY A DISKUZE

Pro jednodušší orientaci ve výsledcích bylo zavedeno jednoduché značení dle tabulky 1.

Tabulka 1: Označení materiálů

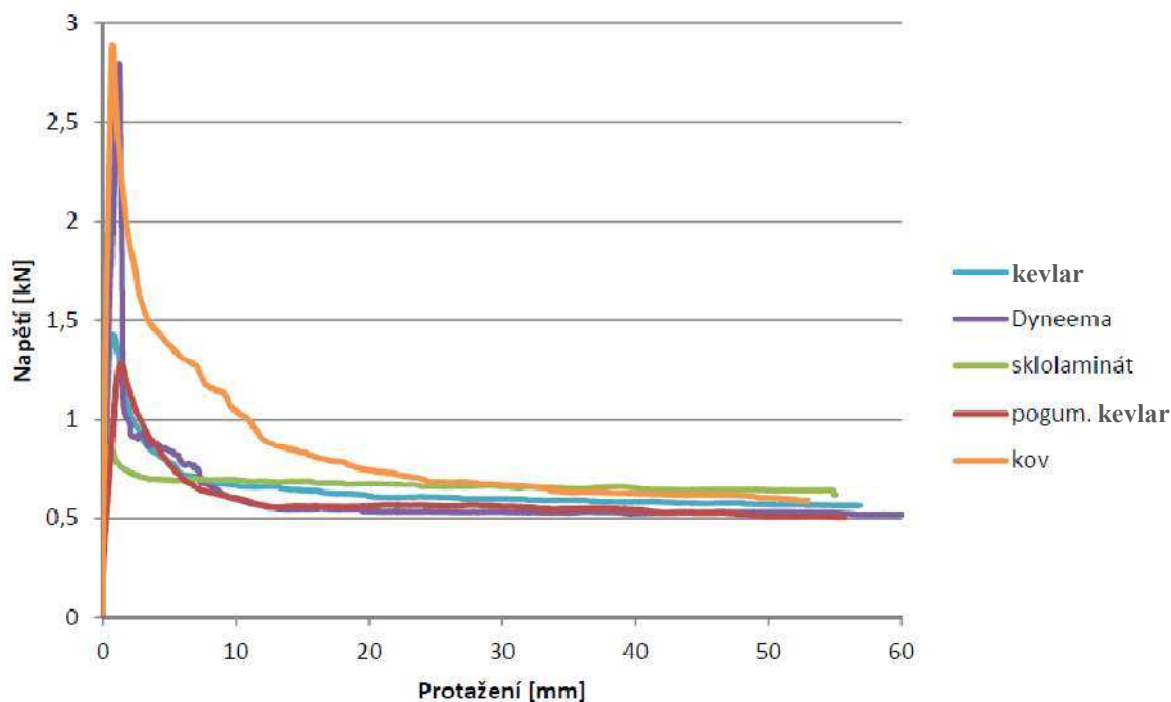
K	Kov	Balistická ocel
A	Aramid	Kevlar
PA	Pogumovaný aramid	Pogumovaný kevlar
KA	Keramika	Balistická keramika
S	Sklolaminát	Balistický sklolaminát
D	Dyneema	Balistický polyetylen (PE)

Při měření byl materiál namáhán pouze do nejvyšší hodnoty zatížení, tak jak udává norma ČSN EN 1465. Po poklesu této hodnoty bylo měření ukončeno. Na obrázku 15 jsou uvedeny grafy tahových křivek pro 1. sérii měření lepidlem Collano 36.104



Obrázek 15: Tahové křivky pro 1. sérii měření lepidlem Biresin UI305.

Jelikož u vzorků nebylo pozorováno po prvním měření žádné mechanické poškození a pevnost spoje se zdála být stále vysoká, byly tyto vzorky podrobeny opětovnému měření po 24 hodinách od předchozího měření. Při druhém měření nedosahovali lepené spoje tak vysokých pevností jako při prvním měření. Což dokazuje, že při prvním měření došlo k porušení lepeného spoje. Křivky měření pro vybraný vzorek od každého druhu spoje při druhém měření jsou zakresleny v obrázku 16.



Obrázek 16: Opakované měření spojů z první série.

1. PEVNOSTI PRO LEPIDLO COLLANO 36.104

1.1. Spojení kovu s ostatními materiály

Naměřené pevnosti pro spojení kovu s ostatními materiály jsou uvedeny v tabulce 2. Nejpevnější spojení kovu bylo s keramikou, dále bylo spojení kov-kov, které mělo o 23 % menší pevnost než s keramikou a pak kov-dyneema, které mělo o 35 % nižší pevnost než kov-kov. Tyto 3 materiály mají hladký povrch a dále v pevnostech následují materiály s drsnějším nebo zvrásněným povrchem, které oproti kov-keramika a kov-kov dosahovali o přibližně 75 % respektive 66 % nižších pevností.

Tabulka 2: Výsledky pevností pro spojení kovu s ostatními materiály

	Zatížení při přetržení [kN]	Směrodatná odchylka
K + KA	17,062	0,825
K + K	13,168	0,622
K + D	8,579	0,251
K + PA	4,787	0,251
K + S	4,531	0,468
K + A	3,993	0,194

1.2. Spojení stejných materiálů

Naměřené pevnosti pro spojení vždy stejných materiálů jsou uvedeny v tabulce 3. Nejpevnějšího spoje bylo dosaženo mezi kovy, dále je spojení sklolaminátů a dyneem s pevností přibližně o 57 % nižší pevností než spojení mezi kovy. A nejslabší spoje byly mezi pogumovanými kevlary a kevlary, které měli přibližně o 71 % nižší pevnost než spoj mezi kovy.

Tabulka 3: Výsledky pevností pro spojení vždy stejných materiálů

	Zatížení při přetržení [kN]	Směrodatná odchylka
K + K	13,168	0,622
S + S	5,767	0,314
D + D	5,510	0,235
PA + PA	3,865	0,332
A + A	3,747	0,367

1.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

Naměřené pevnosti pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích jsou uvedeny v tabulce 4. V rámci směrodatných odchylek byly výsledky velmi podobné. Nejpevnější bylo spojení sklolaminát-dyneema a spojení dyneema-kevlar. Nejslabší bylo spojení pogum. kevlar-kevlar. Všechny spoje dosahovali pevnosti přibližně o 65 % až 77 % nižších pevností než spojení kov-kov.

Tabulka 4: Výsledky pevností pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

	Zatížení při přetržení [kN]	Směrodatná odchylka
S + D	4,523	0,428
D + A	4,223	0,516
S + A	3,893	0,034
S + PA	3,490	1,160
D + PA	3,477	0,452
PA + A	2,961	0,119

2. PEVNOST BIRESIN® U1305

2.1. Spojení kovu s ostatními materiály

Naměřené pevnosti pro spojení kovu s ostatními materiály jsou uvedeny v tabulce 5. Nejpevnější spojení kovu bylo s keramikou, dále bylo spojení kov-sklolaminát, které mělo o 20 % menší pevnost než kov-keramika. Potom jsou spoje kov-kov a kov-dyneema, které mají srovnatelnou pevnost a o 30 % nižší pevnost než spojení kov-keramika. Nakonec jsou spoje kov-pogum. kevlar a kov-kevlar, které mají o 37 % respektive 52 % nižší pevnost než spoj kov-keramika. Zajímavé u lepidla Biresin® U1305 je, že spojení kov-sklolaminát dosáhl vyšších pevností než spoj kov-kov, i když má sklolaminát drsnější povrch.

Tabulka 5: Výsledky pevností pro spojení kovu s ostatními materiály

	Zatížení při přetržení [kN]	Směrodatná odchylka
K + KA	11,550	2,070
K + S	9,323	0,932
K + K	8,148	1,284
K + D	8,111	1,889
K + PA	7,251	2,046
K + A	5,518	2,537

2.2. Spojení stejných materiálů

Naměřené pevnosti pro spojení vždy stejných materiálů jsou uvedeny v tabulce 6. Nejpevnějšího spoje bylo dosaženo mezi kovy, dále je spojení kov-dyneema s pevností přibližně o 22 % nižší pevností než spojení kov-kov. Potom je spoj pogum. kevlar-pogum. kevlar s pevností o 33 % nižší než spoj kov-kov. A nejslabší spoje byly sklolaminát-sklolaminát a kevlar-kevlar, které měly přibližně o 60 % nižší pevnost než spoj kov-kov.

Tabulka 6: Výsledky pevností pro spojení vždy stejných materiálů

	Zatížení při přetržení [kN]	Směrodatná odchylka
K + K	8,148	1,284
D + D	6,367	0,813
PA + PA	5,467	1,256
S + S	3,479	1,834
A + A	3,136	1,695

2.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

Naměřené pevnosti pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích jsou uvedeny v tabulce 7. Nejpevnějšího spojení bylo dosaženo ve spoji dyneema-pogum. kevlar, druhý nejpevnější spoj je dyneema-kevlar, jehož pevnost je o 15 % nižší než spoj dyneema-pogum. kevlar. Dále je spojení sklolaminát-dyneema a sklolaminát-kevlar, které mají přibližně o 33 % nižší pevnost než spojení dyneema-pogum. kevlar. Nejslabší spojení jsou sklolaminát-pogum. kevlar a pogum. kevlar-kevlar, které mají přibližně o 50 % nižší pevnost než dyneema-pogum. kevlar.

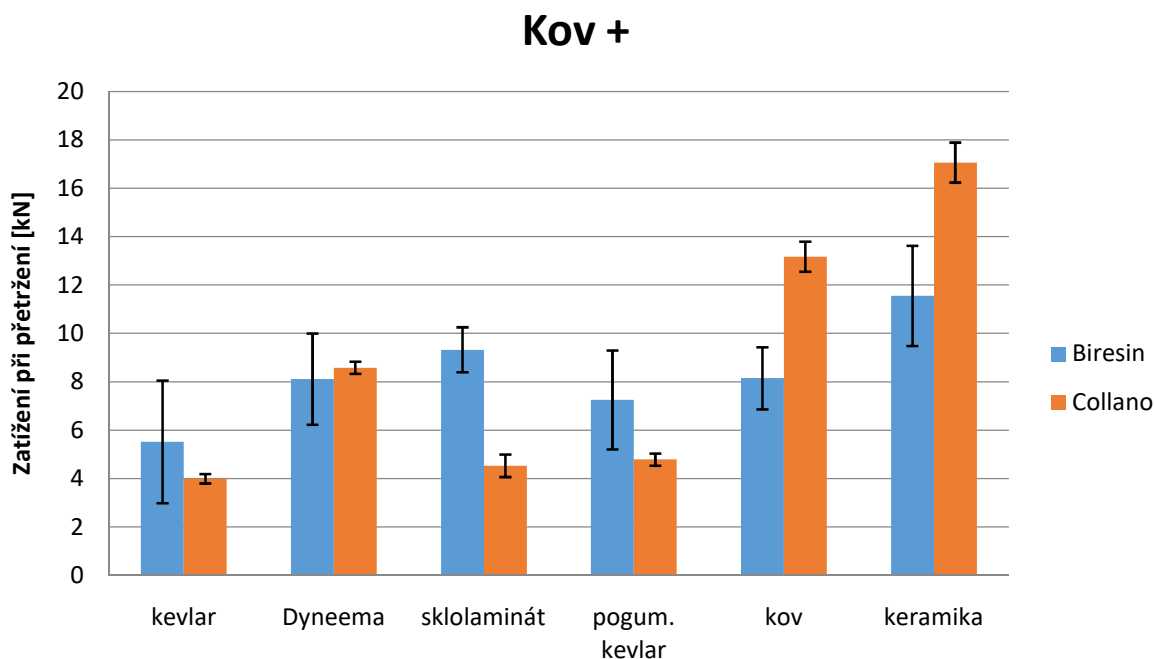
Tabulka 7: Výsledky pevností pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

	Zatížení při přetržení [kN]	Směrodatná odchylka
D + PA	5,204	0,307
D + A	4,394	0,492
S + D	3,625	0,052
S + A	3,359	0,320
S + PA	2,824	0,138
PA + A	2,588	0,128

3. POROVNÁNÍ PEVNOSTI COLLANO 36.104 VS. BIRESIN® U1305

3.1. Spojení kovu s ostatními materiály

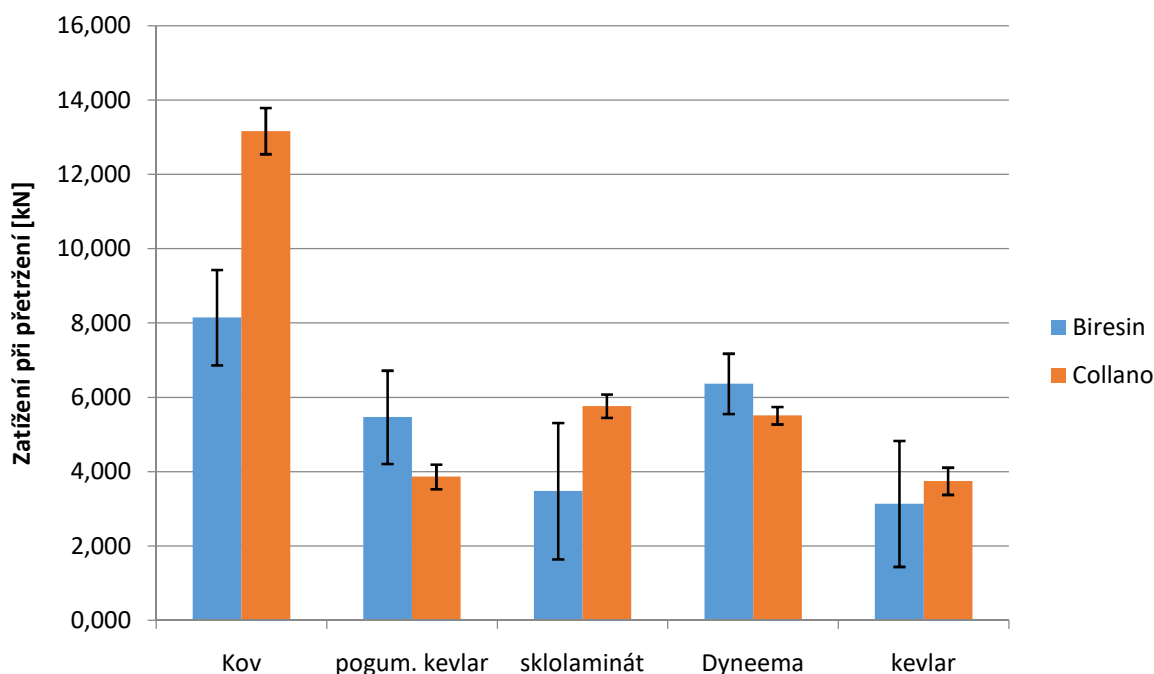
Výsledky jsou pro porovnání uvedeny na obrázku 17. Nejpevnějšího spojení s kovem bylo dosaženo u obou lepidel vždy s keramikou. A naopak nejslabší spojení kovu bylo u obou lepidel s kevlar. I když je trend stejný, je třeba si všimnout, že při použití lepidla Collano, jsou vyšší pevnosti u hladkých materiálů, jako kov a keramika, a to o přibližně 35 % než u těchto materiálů při použití lepidla Biresin. Na druhou stranu při použití lepidla Biresin dosahují vyšších pevností spoje kovu s hrubými a zvrásněnými materiály a to o přibližně 50 % pro spojení kov-sklolaminát a o 30 % pro spojení kov-kevlar a kov-pogum. kevlar než u těchto materiálů při použití lepidla Collano.



Obrázek 17: Výsledky pevností pro spojení kovu s ostatními materiály pro obě lepidla

3.2. Spojení stejných materiálů

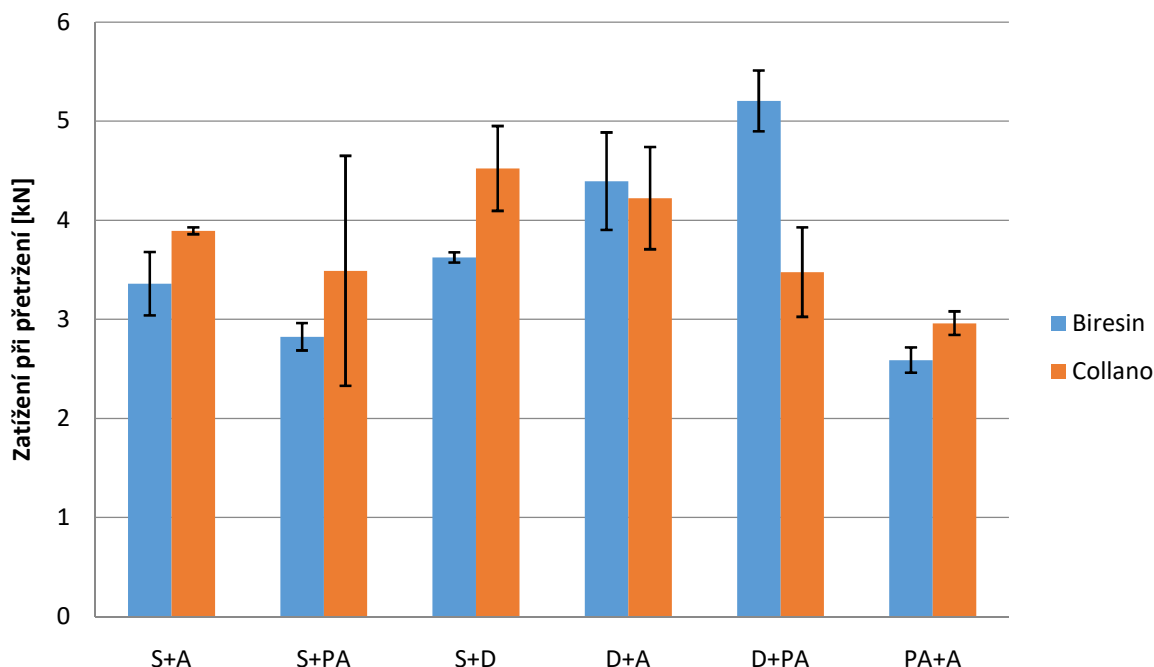
Výsledky jsou pro porovnání uvedeny na obrázku 18. U obou lepidel, podle očekávání, dosáhlo nejpevnějšího spojení kov-kov. A naopak nejslabší spojení bylo mezi kevlarem s kevlarem. Pevnosti mohli být ovlivněny nejen povrchem materiálu, ale i kombinací různých tvrdostí materiálu, kdy kov je netvrdší a kevlar nejměkčí.



Obrázek 18: Výsledky pevností pro spojení vždy stejných materiálů pro obě lepidla

3.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

Výsledky jsou pro porovnání uvedeny na obrázku 19. Trend pevností u lepidla Collano byl pro nejpevnější spoje s tvrdým a hladkým materiálem, až po nejslabší spoje s měkkým a zvrásněným materiálem. U lepidla Biresin byl trend pro nejpevnější spoje s tvrdým a zvrásněným materiálem, až po nejslabší spoje s měkkým a hladkým povrchem.



Obrázek 19: Výsledky pevností pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích pro obě lepidla

4. DEFORMAČNÍ ENERGIE COLLANO 36.104

Deformační energie se vypočítala numerickou integrací závislosti síly na prodloužení.

4.1. Spojení kovu s ostatními materiály

Vypočítané deformační energie pro spojení kovu s ostatními materiály jsou uvedeny v tabulce 8. Nejvíce energie bylo potřeba na přetržení spojení kov-keramika. Dále bylo spojení kov-kov, u kterého bylo potřeba na přetržení o 42 % méně energie než na přetržení spoje kov-keramika. A pak následuje spoj kov-dyneema, na které je pro přetržení potřeba o 52 % méně energie než na přetržení spoje kov-keramika. Stejně jako u pevností je i u deformační energie stejný trend, proto následují spoje s drsnějším nebo zvrásněným povrchem. Na přetržení spoje kovu s těmito materiály bylo potřeba oproti spoje kov-keramika a kov-kov o 70 až 85 % respektive 52 až 73 % méně energie.

Tabulka 8: Výsledky deformační energie pro spojení kovu s ostatními materiály

	Deformační energie do přetržení [J]	Směrodatná odchylka
K + KA	10,192	1,756
K + K	5,927	1,276
K + D	4,912	0,186
K + PA	2,864	1,103
K + A	1,812	0,138
K + S	1,601	0,332

4.2. Spojení stejných materiálů

Vypočítané deformační energie pro spojení vždy stejných materiálů jsou uvedeny v tabulce 9. Nejvíce energie bylo potřeba na přetržení spoje dyneema-dyneema. Dále je spojení pogum. kevlaru-pogum. kevlaru, na které je pro přetržení potřeba skoro stejně energie. Potom jsou spoje kevlar-kevlar, kov-kov a sklolaminát-sklolaminát, na které je pro přetržení potřeba skoro stejná energie a o přibližně 30 % méně energie než na přetržení spoje dyneema-dyneema. Je třeba si povšimnout zvláštního trendu, kdy na přetržení spoje dyneema-dyneema, pogum. kevlar-pogum. kevlar a kevlar-kevlar bylo potřeba více energie než na přetržení kov-kov, i když spoje nedosahovali tak velkých pevností. Což je dáno tím, že u těchto tří materiálů došlo k daleko většímu prodloužení, než se spoje přetrhli.

Tabulka 9: Výsledky deformační energie pro spojení vždy stejných materiálů

	Deformační energie do přetržení [J]	Směrodatná odchylka
D + D	8,062	0,541
PA + PA	7,633	0,247
A + A	5,979	0,397
K + K	5,927	1,276
S + S	5,492	0,176

4.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

Vypočítané deformační energie pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích jsou uvedeny v tabulce 10. Nejvíce energie bylo potřeba na přetržení spojení dyneema-kevlar a dyneema-pogum. kevlar. Dále je spojení pogum. kevlar-kevlar, na které je pro přetržení o 10 % méně energie než na přetržení spoje dyneema-kevlar. Nejméně energie bylo potřeba na přetržení spoje sklolaminát-pogum. kevlar, sklolaminát-dyneema a sklolaminát-kevlar, na která je pro přetržení o 15 až 40 % méně energie než na přetržení spoje dyneema-kevlar. Zde můžeme vidět stejný trend jako v předchozí kapitole, kdy nejvíce energie na přetržení je potřeba při použití dyneemi, dále pogum. kevlar a kevlaru a nakonec sklolaminátu.

Tabulka 10: Výsledky deformační energie pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

	Deformační energie do přetržení [J]	Směrodatná odchylka
D + A	5,550	0,191
D + PA	5,498	0,851
PA + A	5,085	0,246
S + PA	4,699	0,841
S + D	4,259	0,185
S + A	3,361	0,562

5. DEFORMAČNÍ ENERGIE BIRESIN® U1305

5.1. Spojení kovu s ostatními materiály

Vypočítané deformační energie pro spojení kovu s ostatními materiály jsou uvedeny v tabulce 11. Nejvíce energie bylo potřeba na přetržení spojení kov-keramika. Dále jsou spojení kov-pogum, kevlar a kov-sklolaminát, u kterých bylo potřeba na přetržení o 33 % méně energie než na přetržení spoje kov-keramika. Dále jsou spoje kov-kov a kov-dyneema, které mají podobné hodnoty a na které je pro přetržení potřeba přibližně o 40 % méně energie než na přetržení spoje kov-keramika. Nakonec je spoj kov-kevlar, na který je pro přetržení potřeba o 65 % méně energie než na přetržení spoje kov-keramika.

Tabulka 11: Výsledky deformační energie pro spojení kovu s ostatními materiály jsou uvedeny v tabulce 5

	Deformační energie do přetržení [J]	Směrodatná odchylka
K + KA	5,054	1,592
K + PA	3,613	0,151
K + S	3,354	0,502
K + K	3,188	0,795
K + D	2,878	0,985
K + A	1,813	1,049

5.2. Spojení stejných materiálů

Vypočítané deformační energie pro spojení vždy stejných materiálů jsou uvedeny v tabulce 12. Nejvíce energie bylo potřeba na přetržení spoje dyneema-dyneema. Dále je spojení pogum, kevlaru-pogum, kevlaru, na které je pro přetržení potřeba o 13 % méně energie než na přetržení spoje dyneema-dyneema. Dále jsou pak spoje kov-kov, sklolaminát-sklolaminát a kevlar-kevlar, na které je pro přetržení potřeba skoro stejná energie a o přibližně 78 % méně než na přetržení spoje dyneema-dyneema.

Tabulka 12: Výsledky deformační energie pro spojení vždy stejných materiálů

	Deformační energie do přetržení [J]	Směrodatná odchylka
D + D	12,224	2,628
PA + PA	10,624	1,842
K + K	3,188	0,795
S + S	2,528	0,941
A + A	2,425	0,753

5.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum, kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

Vypočítané deformační energie pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum, kevlaru a kevlaru v různých kombinacích jsou uvedeny v tabulce 13. Nejvíce energie bylo potřeba na přetržení spojení dyneema-pogum, kevlar. Dále je spojení dyneema -kevlar, na které je potřeba pro přetržení o skoro 50 % méně energie než na přetržení spoje dyneema- pogum, kevlar. Potom jsou spoje sklolaminát-kevlar, sklolaminát-dyneema, pogum, kevlar-kevlar a sklolaminát-pogum, kevlar, na které je pro přetržení potřeba skoro stejná energie a o přibližně 70 % méně energie než na přetržení spoje dyneema- pogum, kevlar.

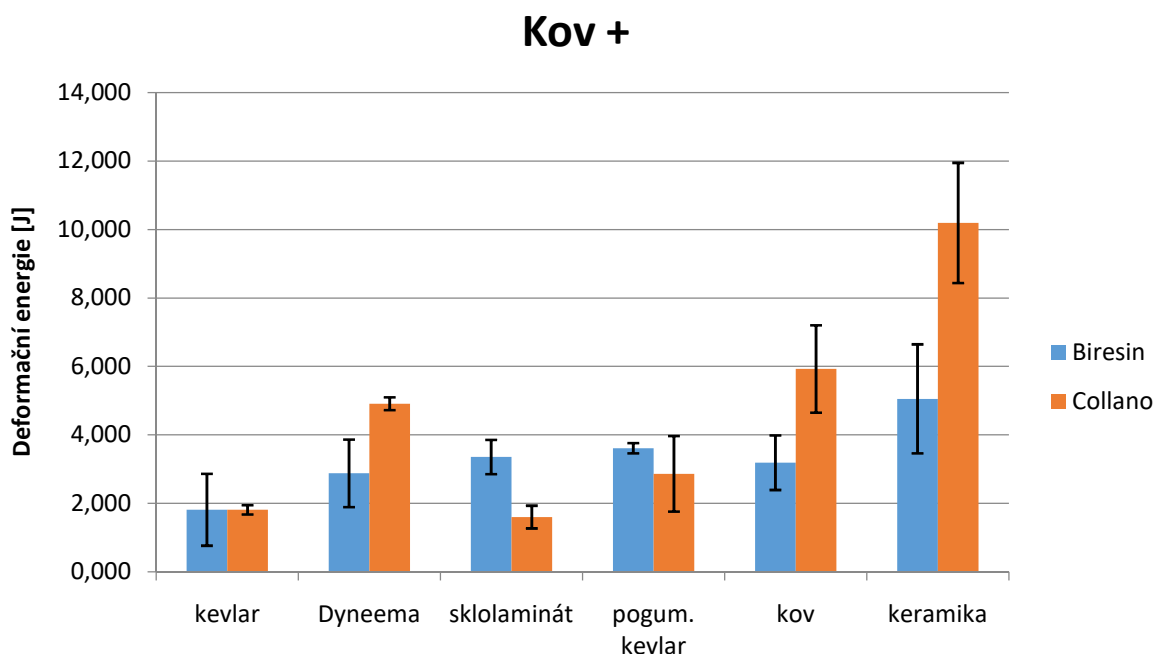
Tabulka 13: Výsledky deformační energie pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

	Deformační energie do přetržení [J]	Směrodatná odchylka
D + PA	7,039	0,634
D + A	3,765	0,396
S + A	2,674	0,056
S + D	2,347	0,189
PA + A	2,330	0,570
S + PA	1,966	0,214

6. POROVNÁNÍ DEFORMAČNÍ ENERGIE COLLANO 36.104 VS. BIRE SIN[®] U1305

6.1. Spojení kovu s ostatními materiály

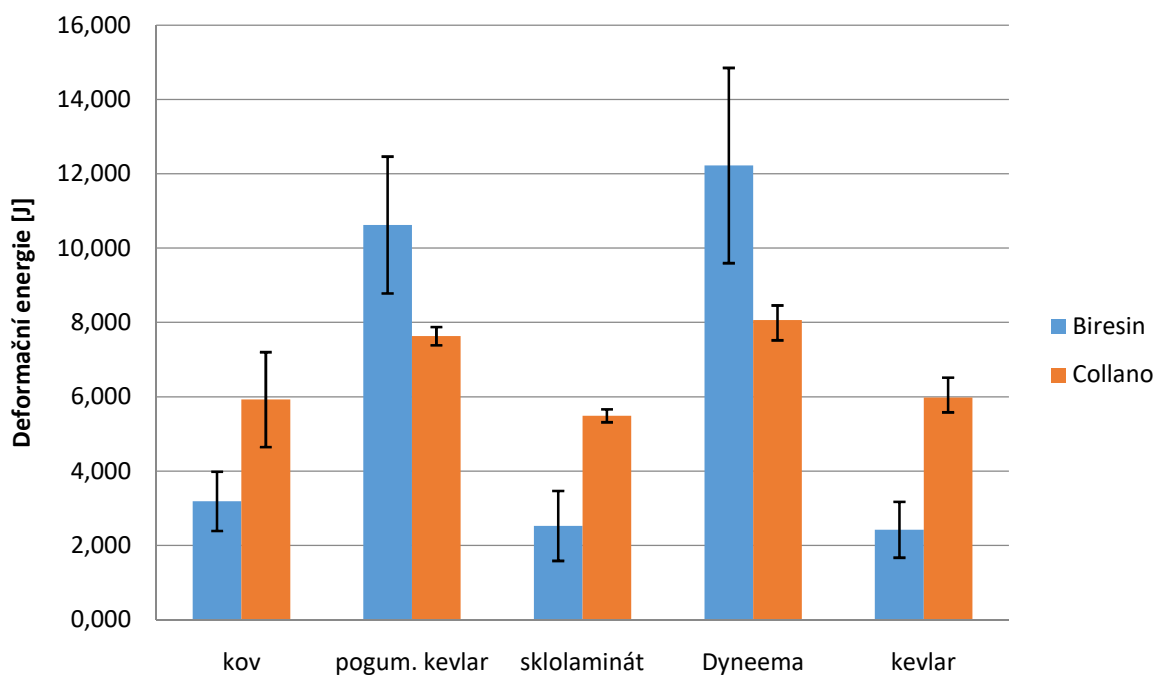
Výsledky jsou pro porovnání uvedeny na obrázku 20. Při použití hladkých materiálů (keramika, kov a dyneema) na spojení s kovem pomocí lepidla Collano, je potřeba na přetržení těchto spojů o 100 % více energie než při spojení lepidlem Biresin. Naopak při lepení lepidle Biresin je potřeba na přetržení spojení kovu s hrubými materiály jako sklolaminát o 100 % více energie než při spojení lepidlem Collano



Obrázek 20: Výsledky deformační energie pro spojení kovu s ostatními materiály pro obě lepidla

6.2. Spojení stejných materiálů

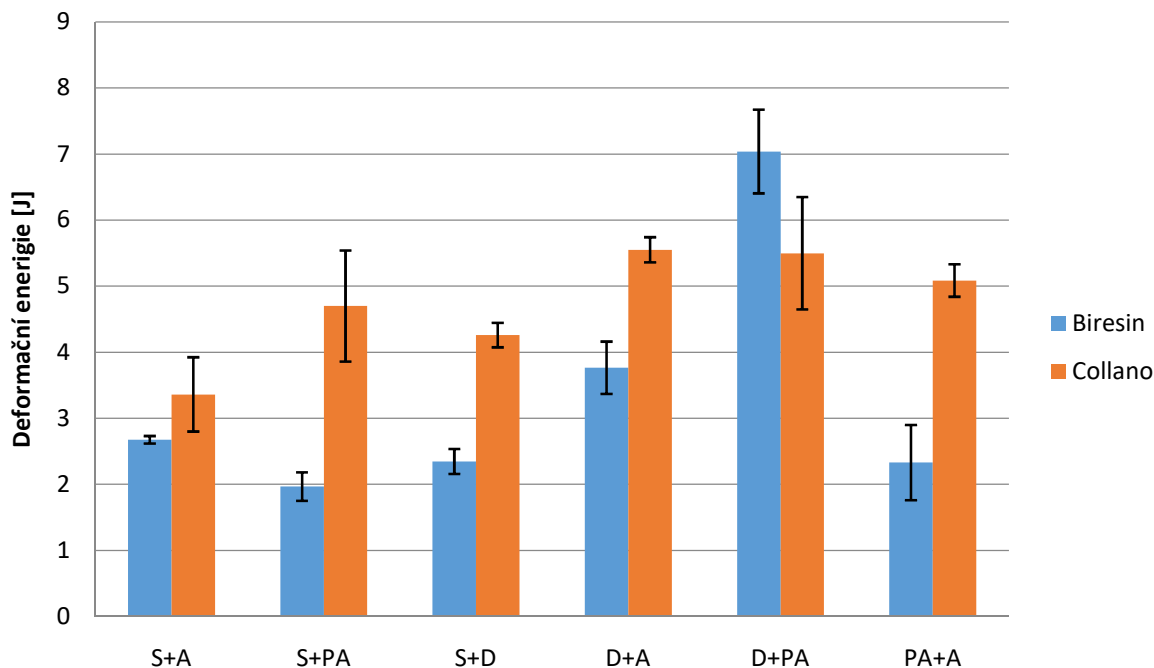
Výsledky jsou pro porovnání uvedeny na obrázku 21. Při požití lepidla Biresin bylo na přetržení spoje dyneema-dyneema a pogum. kevlar-pogum. kevlar potřeba o 50 respektive 40 % více energie než na přetržení těchto spojů při použití lepidla Collano. Naopak při použití lepidla Collano je potřeba na přetržení spoje kov-kov, sklolaminát-sklolaminát a kevlar-kevlar o 90 respektive 117 respektive 146 % více energie než na přetržení těchto spojů při použití lepidla Biresin.



Obrázek 21: Výsledky deformační energie pro spojení vždy stejných materiálů pro obě lepidla

6.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

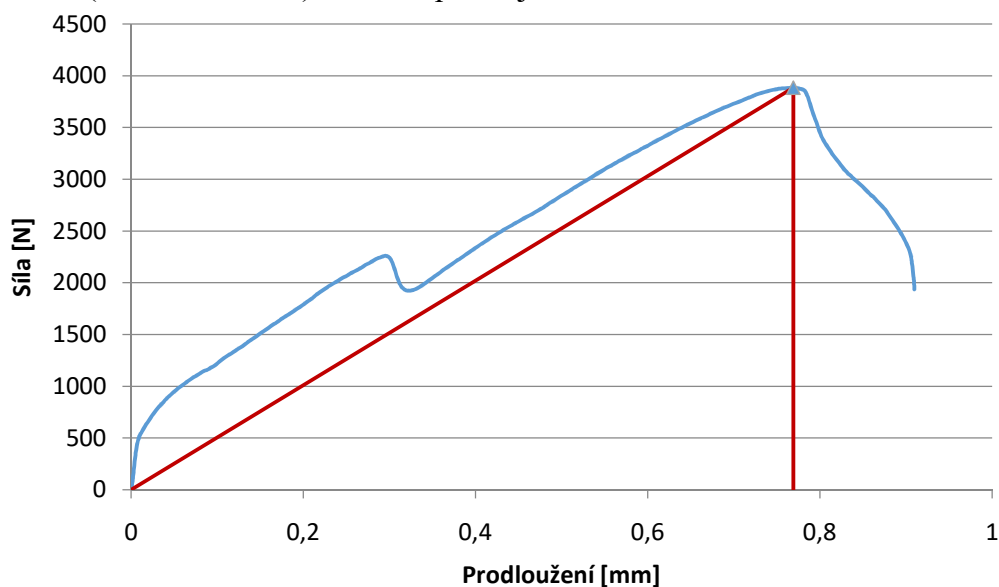
Výsledky jsou pro porovnání uvedeny na obrázku 22. U lepidla Collano bylo potřeba energie na přetržení o více jak 100 % než u lepidla Biresin při spojení sklolaminát-pogum. kevlar a pogum. kevlar-kevlar, o více jak 80 % při spojení sklolaminát-dyneema a o více jak 25 % při spojení sklolaminát-kevlar a dyneema-kevlar. Pouze u spojení dyneema-pogumovaný kevlar při použití lepidla Biresin je potřeba na přetržení o 28 % více energie než při použití lepidla Collano.



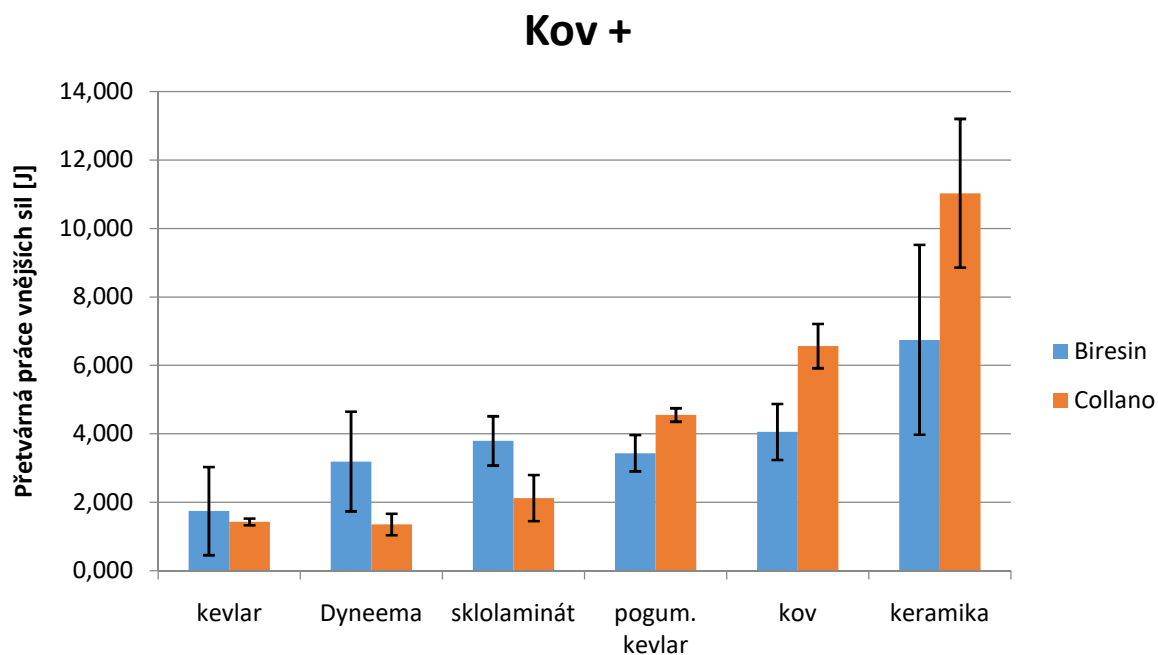
Obrázek 22: Výsledky deformační energie pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích pro obě lepidla

7. PŘETVÁRNÁ PRÁCE VNĚJŠÍCH SIL COLLANO 36.104

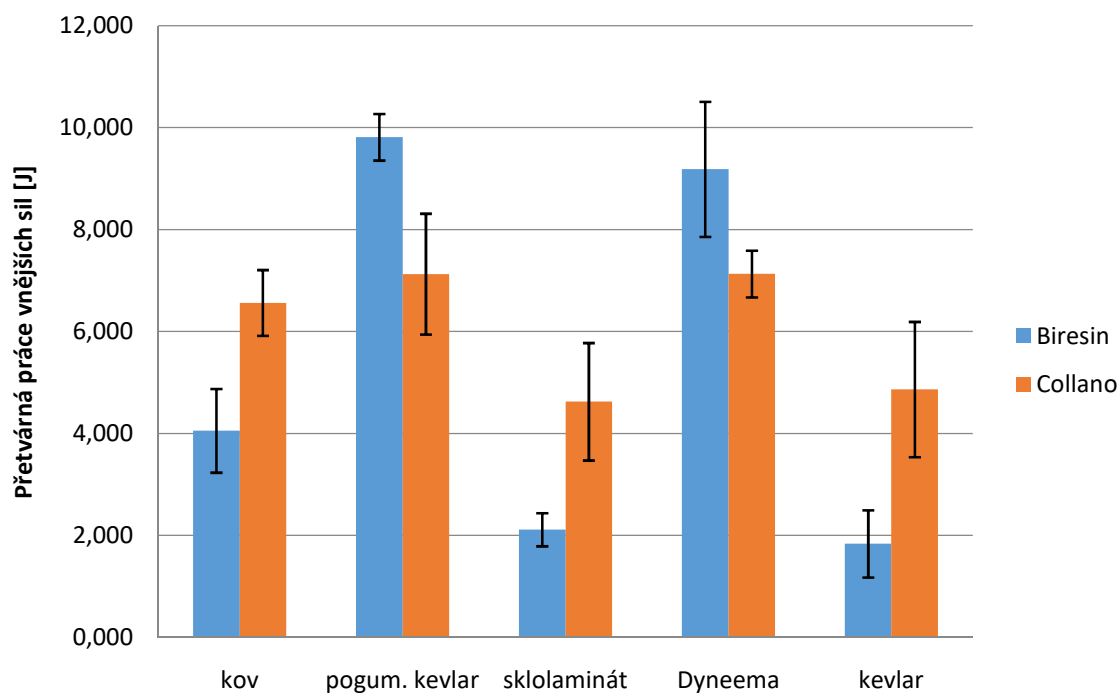
Přetvárná práce vnějších sil byla vypočítána jako plocha pod křivkou trojúhelníku s nejvyšším bodem při přetržení lepeného spoje z grafu závislosti síly na prodloužení (příklad výpočtu na obrázku 23). Bohužel zatěžovací křivky nedosahovali lineárního charakteru, proto jsou výsledná data (obrázek 24 – 26) uvedena pouze jako teoretická.



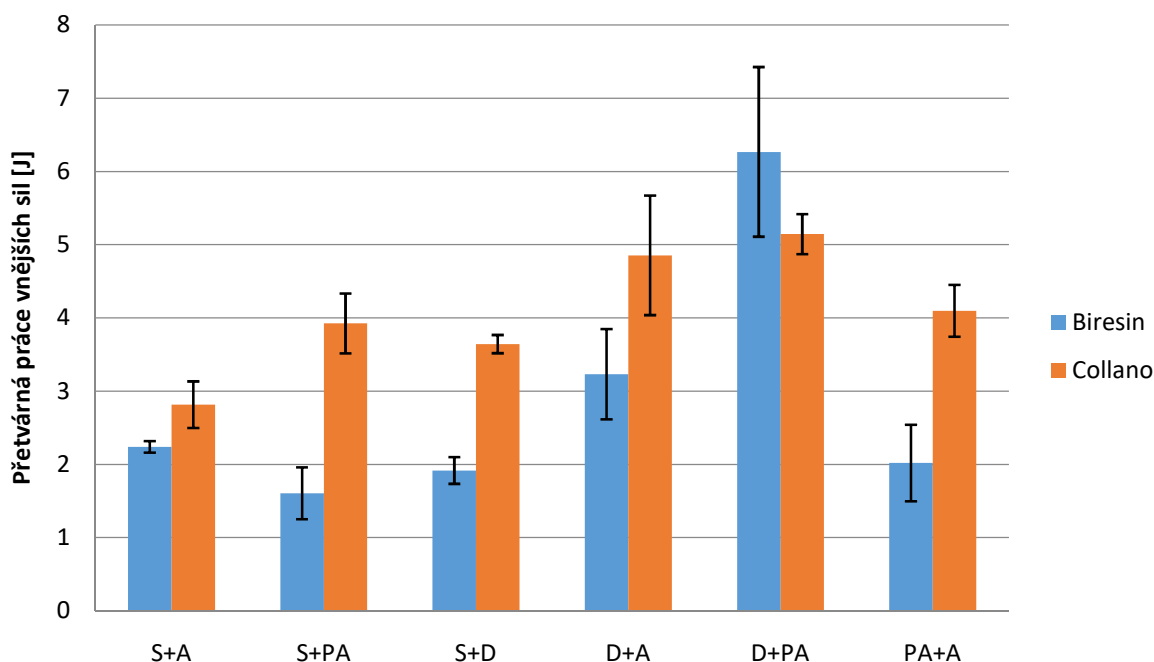
Obrázek 23: Příklad výpočtu přetvárné práce vnějších sil.



Obrázek 24: Výsledky přetvárné práce vnějších sil pro spojení kovu s ostatními materiály pro obě lepidla



Obrázek 25: Výsledky přetvárné práce vnějších sil pro spojení vždy stejných materiálů pro obě lepidla



Obrázek 26: Výsledky přetvárné práce vnějších sil pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích pro obě lepidla

8. HUSTOTA DEFORMAČNÍ ENERGIE COLLANO 36.104

Hustota deformační energie se vypočítala numerickou integrací závislosti deformace objemu na napětí. Tloušťka lepeného spoje byla 1 mm.

8.1. Spojení kovu s ostatními materiály

Vypočítané hustoty deformačních energií pro spojení kovu s ostatními materiály jsou uvedeny v tabulce 14. Nejvyšší hodnoty hustoty deformační energie má spojení kov-keramika. Dále bylo spojení kov-kov, které má hodnoty hustoty deformační energie o 42 % menší než spojení kov-keramika. A pak následuje spoj kov-dyneema, které má hodnoty hustoty deformační energie o 52 % menší než spojení kov-keramika. A nakonec spojení kov-pogum. kevlar, kov-kevlar a kov-sklolaminát má hodnoty hustoty deformační energie oproti spojení kov-keramika a kov-kov o 70 až 85 % respektive 52 až 73 % menší.

Tabulka 14: Výsledky hustoty deformační energie pro spojení kovu s ostatními materiály

	Hustota deformační energie [J]	Směrodatná odchylka
K + KA	203,833	35,120
K + K	118,534	25,520
K + D	98,230	3,719
K + PA	57,273	22,055
K + A	36,244	2,762
K + S	32,011	6,639

8.2. Spojení stejných materiálů

Vypočítané hustoty deformačních energií pro spojení vždy stejných materiálů jsou uvedeny v tabulce 15. Nejvyšší hodnoty hustoty deformační energie má spojení dyneema-dyneema. Dále je spojení pogum. kevlaru-pogum. kevlaru, které má skoro stejné hodnoty hustoty deformační energie. Potom jsou spoje kevlar-kevlar, kov-kov a sklolaminát-sklolaminát, které

mají hodnoty hustoty deformační energie o přibližně 30 % menší než spojení dyneema-dyneema.

Tabulka 15: Výsledky hustoty deformační energie pro spojení vždy stejných materiálů

	Hustota deformační energie [J]	Směrodatná odchylka
D + D	161,233	12,159
PA + PA	152,662	16,963
A + A	119,578	20,741
K + K	118,534	25,520
S + S	109,832	15,357

8.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

Vypočítané hustoty deformačních energií pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích jsou uvedeny v tabulce 16. Nejvyšší hodnoty hustoty deformační energie má spojení dyneema-kevlar a dyneema-pogum. kevlar. Dále je spojení pogum. kevlar-kevlar, které má hodnoty hustoty deformační energie o 10 % menší než spojení dyneema-kevlar. Nejmenší hodnoty hustoty deformační energie má spojení sklolaminát-pogum. kevlar, sklolaminát-dyneema a sklolaminát-kevlar, které jsou o 15 až 40 % menší než spojení dyneema-kevlar.

Tabulka 16: Výsledky hustoty deformační energie pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

	Hustota deformační energie [J]	Směrodatná odchylka
D + A	111,002	3,819
D + PA	109,956	17,021
PA + A	101,694	4,916
S + PA	93,976	16,821
S + D	85,175	3,701
S + A	67,215	11,247

9. HUSTOTA DEFORMAČNÍ ENERGIE BIRESIN® U1305

9.1. Spojení kovu s ostatními materiály

Vypočítané hustoty deformačních energií pro spojení kovu s ostatními materiály jsou uvedeny v tabulce 17. Nejvyšší hodnoty hustoty deformační energie má spojení kov-keramika. Dále jsou spojení kov-pogum. kevlar a kov-sklolaminát, které mají hodnoty hustoty deformační o 33 % menší než spojení kov-keramika. Dále jsou spoje kov-kov a kov-dyneema, které mají podobné hodnoty hustoty deformační energie a jsou přibližně o 40 % menší než spojení kov-keramika. Nakonec je spoj kov-kevlar, který má hodnoty hustoty deformační energie o 65 % menší než spojení kov-keramika.

Tabulka 17: Výsledky hustoty deformační energie pro spojení kovu s ostatními materiály jsou uvedeny v tabulce 5

	Hustota deformační energie [J]	Směrodatná odchylka
K + KA	101,072	31,841
K + PA	72,253	3,015
K + S	67,088	10,043
K + K	63,752	15,721

K + D	57,559	19,707
K + A	36,256	20,971

9.2. Spojení stejných materiálů

Vypočítané hustoty deformačních energií pro spojení vždy stejných materiálů jsou uvedeny v tabulce 18. Nejvyšší hodnoty hustoty deformační energie má spojení dyneema-dyneema. Dále je spojení pogum. kevlaru-pogum. kevlaru, které má hodnoty hustoty deformační o 13 % menší spojení dyneema-dyneema. Dále jsou pak spoje kov-kov, sklolaminát-sklolaminát a kevlar-kevlar, které mají hodnoty hustoty deformační energie skoro stejné a o přibližně 78 % menší než spojení dyneema-dyneema.

Tabulka 18: Výsledky hustoty deformační energie pro spojení vždy stejných materiálů

	Hustota deformační energie [J]	Směrodatná odchylka
D + D	244,475	12,258
PA + PA	212,474	11,147
K + K	63,752	15,721
S + S	50,565	3,697
A + A	48,499	2,369

9.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

Vypočítané hustoty deformačních energií pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích jsou uvedeny v tabulce 19. Nejvyšší hodnoty hustoty deformační energie má spojení dyneema-pogum. kevlar. Dále je spojení dyneema -kevlar, které má hodnoty hustoty deformační o skoro 50 % menší než spojení dyneema- pogum. kevlar. Potom jsou spoje sklolaminát-kevlar, sklolaminát-dyneema, pogum. kevlar-kevlar a sklolaminát-pogum. kevlar, které mají hodnoty hustoty deformační energie skoro stejná a o přibližně 70 % menší než spojení dyneema- pogum. kevlar.

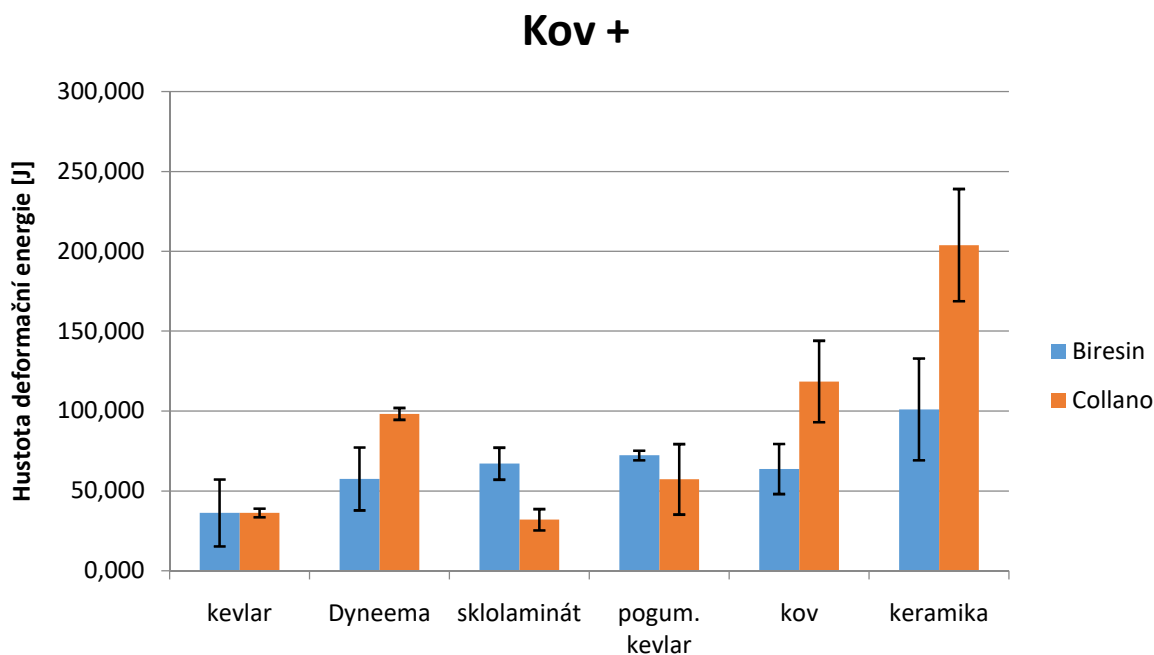
Tabulka 19: Výsledky hustoty deformační energie pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

	Hustota deformační energie [J]	Směrodatná odchylka
D + PA	140,773	12,682
D + A	75,305	7,915
S + A	53,490	1,129
S + D	46,932	3,784
PA + A	46,597	11,393
S + PA	39,316	4,289

10. POROVNÁNÍ HUSTOTY DEFORMAČNÍ ENERGIE COLLANO 36.104 VS. BIRESIN® U1305

10.1. Spojení kovu s ostatními materiály

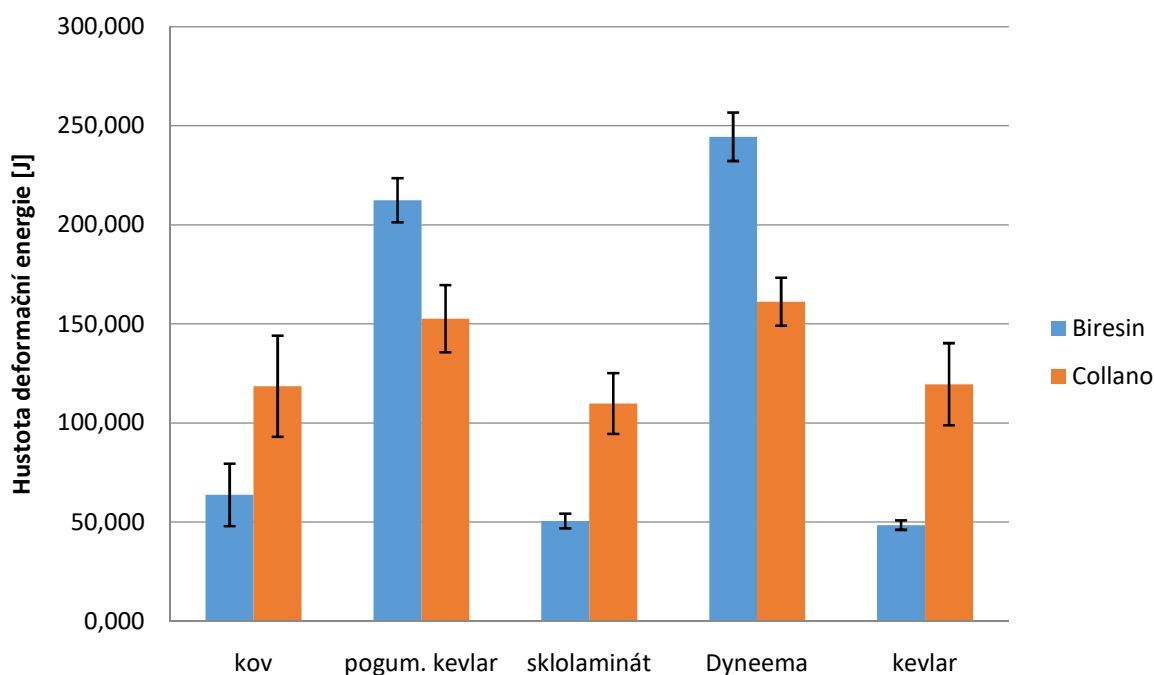
Výsledky jsou pro porovnání uvedeny na obrázku 27. Při použití lepidla Collano jsou hodnoty hustoty deformačních energií pro spoje kovu s hladkými materiály vyšší než při použití lepidla Biresin. Naopak při použití lepidla Biresin jsou hodnoty hustoty deformačních energií vyšší pro spoje s hrubými nebo zvrásněnými materiály.



Obrázek 27: Výsledky hustoty deformační energie pro spojení kovu s ostatními materiály pro obě lepidla

10.2. Spojení stejných materiálů

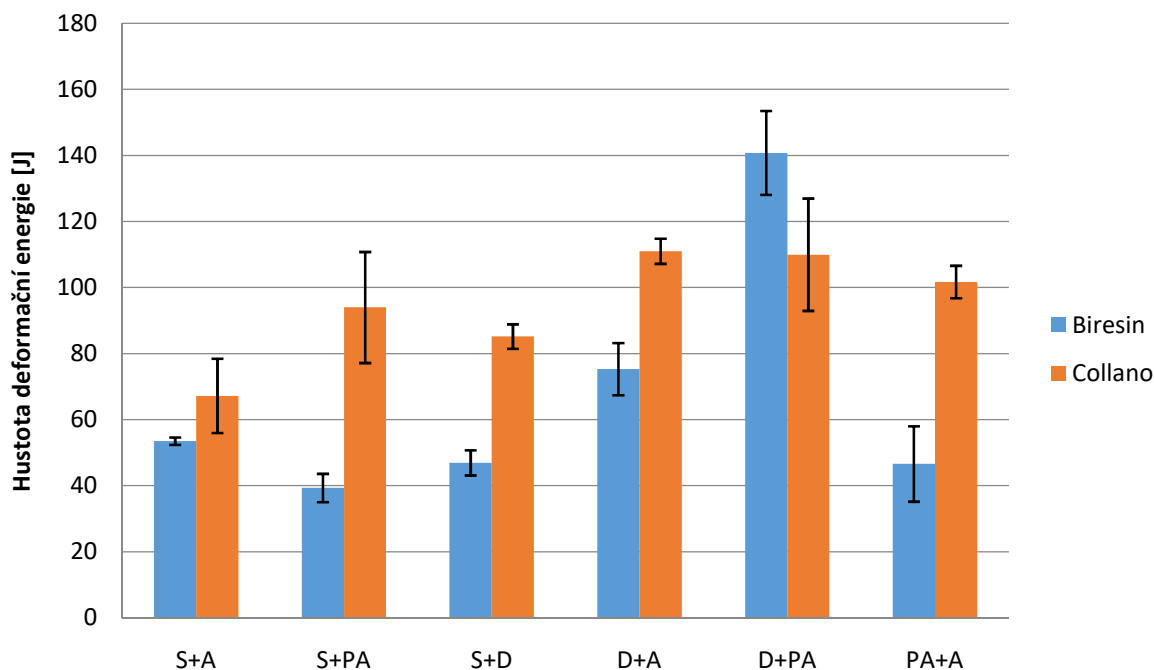
Výsledky jsou pro porovnání uvedeny na obrázku 28. Při požití lepidla Biresin mají vyšší hodnotu hustoty deformační energie spoje dyneema-dyneema a pogum. kevlar-pogum. kevlar než při použití lepidla Collano. A naopak při požití lepidla Collano mají vyšší hodnotu hustoty deformační energie spoje kov-kov, kevlar-kevlar a sklolaminát-sklolaminát.



Obrázek 28: Výsledky hustoty deformační energie pro spojení vždy stejných materiálů pro obě lepidla

10.3. Spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích

Výsledky jsou pro porovnání uvedeny na obrázku 29. Při požití lepidla Collano mají vyšší hodnotu hustoty deformační energie spoje sklolaminát-kevlar, sklolaminát-pogum. kevlar, sklolaminát-dyneema, dyneema-kevlar a pogum. kevlar-kevlar než při použití lepidla Biresin. A naopak při požití lepidla Biresin má vyšší hodnotu hustoty deformační energie pouze spoj dyneema-pogum. kevlar.



Obrázek 29: Výsledky hustoty deformační energie pro spojení sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích pro obě lepidla

11. ZÁVĚR

Na základě získaných hodnot bylo zjištěno, že u lepidel Collano 36.104 a Biresin® U1305 je nejpevnější spojení balistická ocel-balistická keramika-balistická ocel, kdy ale lepidlo Collano 36.104 dosahovalo o 50 % vyšší pevnosti. Dále bylo zjištěno, že lepidlo Collano má vyšší pevnosti spojů při použití hladkých materiálů, jako kov a keramika, a to o přibližně 50 % více než u těchto materiálů při použití lepidla Biresin. Zatímco lepidlo Biresin dosahuje vyšších pevností při použití drsných nebo zvrásněných materiálů, a to o přibližně 50 % pro spojení kov-sklolaminát a o 30 % pro spojení kov-kevlar a kov-pogum. kevlar než u těchto materiálů při použití lepidla Collano.

Při lepení stejných materiálů je Collano lepší pro spojení sklolaminát-sklolaminát a kevlar-kevlar, kdy spoje mají o 66 % respektive 20 % vyšší pevnost, než při lepení lepidlem Biresin. Naopak lepidlo Biresin je lepší pro spoje dyneema-dyneema a pogum. kevlar-pogum. kevlar, kdy spoje mají o 15 % respektive 40 % vyšší pevnost, než spoje při lepení lepidlem

Při spojování sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích je lepidlo Collano ve spoji sklolaminát-kevlar pevnější o 16 %, ve spoji sklolaminát-pogum. kevlar o 24 %, ve spoji sklolaminát-dyneema o 25 % a ve spoji pogum. kevlar-kevlar o 15 % než jednotlivé spoje slepené lepidlem Biresin. Zatímco při použití lepidla Biresin jsou spoje dyneema-kevlar o 5 % a dyneema-pogum. kevlar o 50 % pevnější než jednotlivé spoje slepené lepidlem Collano.

U deformační energie a hustoty deformační energie jsou trendy stejné. Při použití lepidla Collano na spojení kovu s hladkými materiály (keramika, kov a dyneema), je na přetržení těchto spojů potřeba o 100 % více energie než při spojení lepidlem Biresin. Naopak při lepení lepidle Biresin je potřeba na přetržení spojení kovu s hrubými materiály jako sklolaminát o 100 % a pogum. kevlar o 26 % více energie než při spojení lepidlem Collano.

Při lepení stejných materiálů má Collano deformační energie a hustoty deformační energie u spojů kov-kov o 90 %, sklolaminát-sklolaminát 117 % a kevlar-kevlar o 146 % vyšší než u lepidla Biresin. Naopak Biresin má vyšší deformační energie a hustoty deformační energie u spojů dyneema-dyneema o 50 % a pogum. kevlar-pogum. kevlar o 40 % než spojení lepidlem Collano.

Při spojování sklolaminátu, dyneemi, pogum. kevlaru a kevlaru v různých kombinacích má lepidlo Collano vyšší deformační energie a hustoty deformační energie u spojů sklolaminát-kevlar, sklolaminát-pogum. kevlar, sklolaminát-dyneema, dyneema-kevlar a pogum. kevlar-kevlar. Naopak lepidlo Biresin má vyšší deformační energie a hustoty deformační energie u spojů dyneema-pogum. kevlar.

LITERATURA

- [1] DEKEL E, Rosenberg Z. Terminal Ballistics. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg 2012.
- [2] HAZELL P J. Ceramic Armour: Design and Defeat Mechanisms. Argos Press. Canberra 2006.
- [3] Wiśniewski A. Pancerze - budowa, projektowanie i badanie. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2001.
- [4] ARIAS A, López-Puente J, Navarro C, Zaera R. The effect of the thickness of the adhesive layer on the ballistic limit of ceramic/metal armours. An experimental and numerical study. International Journal of Impact Engineering 2005; 32: 321-336, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2005.07.014>.
- [5] D'ENTREMONT B, Grujicic M, Pandurangan B. The role of adhesive in the ballistic/structural performance of ceramic/polymer-matrix composite hybrid armor. Materials and Design 2012; 41: 380-393, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.023>.
- [6] GODZIMIRSKI J, Janiszewski J, Rośkowicz M, Surma Z. Ballistic resistance tests of multi-layer protective panels. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2015; 17 (3): 416–421, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.3.12>.
- [7] FAZOL B G, Iannucci L, Yong M. Efficient modelling and optimisation of hybrid multilayered plates subject to ballistic impact, International Journal of Impact Engineering 2010; 37: 605-624, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.07.004>
- [8] Płonka B, Senderski J, Wiśniewski A, Witkowski Z. Wielowarstwowe metalowo-ceramiczne pasywne pancerze dla helikopterów i pojazdów specjalnych. Problemy Techniki Uzbrojenia 2011; 40: 57-64
- [9] BELL W C, Grujicic M, Pandurangan B. Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems. Materials and Design 2012; 34: 808-819, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.007>
- [10] BOJAR Z, Dolata-Groszc A, Formanek B, Jóźwiak S, Szczucka-Lasota B. Intermetallic alloys with oxide particles and technological concept for high loaded materials. Journal of Materials Processing Technology - J MATER PROCESS TECHNOL 2005; 162:46-51.
- [11] CHEESEMAN B A, Grujicic M, Hea T, Pandurangana B, Randow C L, Yenb C F. Computational investigation of impact energy absorption capability of polyurea coatings via deformation-induced glass transition. Materials Science and Engineering A 2010; 527: 7741-7751, <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2010.08.042>
- [12] MENDIS P, Mohotti D, Ngo T, Raman S N. Polyurea coated composite aluminium plates subjected to high velocity projectile impact. Materials and Design 2013; 52: 1-16, <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.05.060>
- [13] BOGETTI T A, Fink B K, Gama B A, et al. Aluminium foam integral armor: a new dimension in armor design. Composite Structures 2001; 52:381-395, [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00029-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00029-0)
- [14] OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986. Polytechnická knižnice. Řada 2, Příručky (1)
- [15] BERAN, Rudolf. Základy teorie lepení. In: ABC lepidla [online]. Brno: Lear, a.s., 2014 [cit. 2017-03-25]. Dostupné z: http://www.abclepidla.cz/Files/file/files/Teorie_lepeni.pdf
- [16] KOLEKTIV AUTORŮ. Loctite, *Worldwide Design Handbook*. 2. vyd. Mainz: Erasmusdruck GmbH, 1998. 452 s. ISBN 0-9645590-0-5
- [17] LANGMAIER, Ferdinand. *Adhese a adhesiva*. Zlín: FT VUT ve Zlíně, 1999, 106 s. ISBN 80-214-1373-5.

- [18] LENFELD, Petr. *Technologie II*. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní. Dostupné z: www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm
- [19] OSTEN, Miloš. *Lepení plastických hmot*. Praha: SNTL, 1972, 150 s.
- [20] BRUYNE, N., A., Houwink, R. *Adhesion and Adhesives*. Elsevier, New York 1968
- [21] Vybíral, B. *Mechanika pružného tělesa*. Fyzikální olympiáda [online] 2017 [cit. 2017-04-22]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/pruznost.pdf>
- [22] ZÍDEK Rostislav, Brdečko Luděk. *Pružnost a plasticita – energetické metody*. Brno, 2014. Cvičebnice. VUT v Brně, Fakulta stavební. Ke stažení na: www.fce.vutbr.cz/STM/brdecko.l/html/distcz.htm
- [23] POKORNÝ, Jiří. *Lepení a tmelení v dílně i domácnosti*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 2000. 104 s. ISBN 80-7169-857-1
- [24] MÜLLER, Miroslav. *Vliv tloušťky lepené vrstvy na pevnost lepených spojů* [online]. 5/2003 [citováno 2018-05]. Dostupné z WWW:<http://www.tnvydavatelstvi.cz/svarovani/05/str_24.pdf>.
- [25] TRHOŇ, V. *Analýza lepidel ve všeobecném strojírenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaroslav Kubíček
- [26] VESELÝ, J. *Vliv stavu povrchu na únavovou a statickou pevnost lepeného spoje*. Plzeň. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2013. 66 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Beneš, Ph.D
- [27] ŠILER, P., I. KOLÁŘOVÁ a H. SZKLORZOVÁ. *Instrumentation in material engineering: Učební text pro předmět Instrumentace v materiálovém inženýrství*