

Vliv druhu lepidla a kovového podkladu na přídržnost lepených spojů po korozní zkoušce v umělé atmosféře solné mlhy

Influence of the adhesive type and metal substrate on adhesion of bonded joints after salt spray test

Machalická K., Pokorný P., Vokáč M.

ČVUT – Kloknerův ústav

E-mail: klara.machalicka@cvut.cz

Tento článek byl zaměřen na vyhodnocení vlivu expozice neutrální solné mlhy (dle ISO 9124), postupem E4, na mechanické vlastnosti nosných lepených spojů. Studie také posuzuje vliv podkladu lepeného spoje (ocel, slitiny hliníku) a jeho povrchové úpravy (galvanické zinkování, eloxování) a stupně zdrsnění (ověřeno prostřednictvím optické konfokální mikroskopie) na mechanické vlastnosti spoje. Experimentální program zahrnoval lepidla na bázi akrylátu a na kombinované bázi silikonu a polyuretanu, která byla aplikována v dvojité přepletovaných spojih zatěžovaných smykem.

This article was focused on the evaluation of neutral salt spray test effect (according to ISO 9124), procedure E4, on mechanical properties of load-bearing adhesive joints. The study also comprises the influence of substrate material (mild steel, aluminum alloys) and substrate surface roughness (verified by optical confocal microscopy). The experimental program contained acrylate-based adhesive and hybrid silicone polyurethane based adhesive which were applied in double lap joints loaded by shear.

ÚVOD

Hliník a jeho slitiny jsou i v současnosti ve stavebnictví stále oblíbenými materiály. Jejich využití bývá upřednostňováno u nosných profilů lehkých obvodových plášťů, opláštění fasád a lehkých střešních krytin, nenosných konstrukcí a stavebních doplňků (např. stínící lamely apod.) kde, oproti konvenčně využívané uhlíkové oceli, mají několik zásadních výhod – nízkou hustotu a dobrou korozní odolnost s ohledem na atmosférickou korozi [1-4]. Navíc některé ze slitin hliníku je možné anodicky oxidovat (eloxování) a tím dále zvyšovat jejich korozní odolnost, odolnost vůči opotřebení a upravovat estetické vlastnosti [1].

Ve stavebnictví bývají s oblibou využívány slitiny hliníku, které lze precipitačně vytvrzovat, tj. zvyšovat jejich mechanické vlastnosti. Patří jsem především tzv. pantaly (slitiny s hořčíkem a křemíkem), a méně často i duraly (slitiny s mědí, případně mědí a hořčíkem). Používají se i slitiny pouze s hořčíkem (tzv. hydronalia), ale ty nelze precipitačně vytvrzovat [5-8].

Největší podíl spotřebovaného hliníku ve stavebnictví je v současnosti využíván při výrobě tzv. fasádních prvků (tvarované profily a trubky, plechy pro opláštění),

kteří tvoří lehké obvodové pláště budov v podobě nejčastěji předsunutých fasád. Tyto v současnosti často rozsáhlé konstrukce jsou typické pro nákupní centra, banky, kancelářské budovy firem, průmyslové haly a v neposlední řadě i autobusová a vlaková nádraží [1].

Pokud jde o materiály lehkých obvodových plášťů (LOP), část z nich se nevyrábí z hliníku a jeho slitin, ale konvenčně i z uhlíkové oceli, která je proti atmosférické korozi chráněna povlakem žárového zinku. Konstrukce tohoto typu jsou obvykle masivnější, povlaky žárového zinku jsou často využívány jako protikorozní systém také pro nosné ocelové konstrukce. Zinek jako kov je přírodním materiálem a proto při jeho kombinaci s jinými přírodními materiály (kámen, dřevo, sklo) může být dosaženo vizuálně působivého efektu [9]. Z estetických důvodů může být v architektuře (především v interiéru) upřednostněna galvanicky zinkovaná ocel před povlaky žárového zinku (např. perforované plechy, prvky označované jako „tahokov“).

Žárovým zinkováním rozumíme vylučování zinkového povlaku z taveniny zinku (cca 450 °C). Povlak je z vnitřní části složen z intermetalických fází Fe–Zn a z vnější části z vrstvy v podstatě čistého zinku (η-fáze, obsahuje pouze 0,03 hm. % Fe). O skladbě a tloušťce

povlaku rozhoduje celá řada parametrů (nejvýznamněji složení oceli a pracovní lázně) [9-14].

Zinkování lze realizovat i galvanickou technologií, tj. pomocí průchodu stejnosměrného proudu (vylučování kovů z roztoků elektrolytů). K vylučování povlaku se využívá celá řada lázní. Povlak vzniklý galvanickým zinkováním je tvořen čistým zinkem a dosahuje nižších tloušťek, než povlak vzniklý žárovým zinkováním. Pokud budeme posuzovat složení externí vrstvy povlaku žárového zinku a povlaku vzniklého galvanickým zinkováním budou se z hlediska chemického složení lišit jen minimálně. Toto platí, pokud je ovšem rozvrstvení fází v povlaku žárového zinku optimální a povlak není tvořen v podstatě pouze fází ζ (specifický obsah Si v oceli) [12, 15, 16].

Oba typy kovových povrchů se využívají na konstrukce lehkých obvodových plášťů a to jak na nosnou kostru LOP tak na panely opláštění. Opláštění je často výhodné připojovat pomocí lepeného spoje, který má řadu výhod ve srovnání se spojem šroubovaným. Především, lepený spoj v závislosti na tuhosti a geometrii spoje lze, na rozdíl od spoje šroubovaného, vytvořit s rovnoměrným rozložením napětí, které vzniká od přenášeného zatížení. Polymerní lepidlo ve spoji také nepředstavuje lokální tepelný most tak, jak je tomu u šroubovaných spojů. V závislosti na konkrétním druhu lepidla, lepidlo ve spoji může plnit i funkci těsnící, lze spojovat různé druhy materiálů i včetně tenkých materiálů. Vzhledem k hladkému povrchu panelů opláštění může být užití lepeného spoje také vyžadováno architektem z estetických důvodů (fasáda totiž poskytuje první vizuální dojem o stavbě) nebo z důvodů údržby a čištění. Tradičně jsou pro lepení na fasádách používány konstrukční silikonové těsnící lepidla, zejména pro systémy strukturálního zasklení [17], [18]. Konstrukční silikony jsou lepidla vhodná na elastické lepení, ale dosahují nižších pevností v tahu a ve smyku než lepidla polotuhá (akrylátová nebo polyuretanová lepidla). Požadavek na menší plochu spoje a tedy štihlejší nosnou konstrukci, nebo větší panel opláštění vede k vyšším nárokům na únosnost spoje a tedy na pevnost lepidla. Polotuhá lepidla ale jsou primárně navržena pro automobilový průmysl a jejich aplikace ve stavebním inženýrství, např. na fasádách budov, je nutno ověřit experimentálně. Specifickým požadavkem na lepené spoje užitých na fasádě je jejich trvanlivost a odolnost okolnímu prostředí. Na rozdíl od trvanlivých silikonů, odolnost okolnímu prostředí v aplikaci na fasádě není pro polotuhá lepidla s vyšší pevností přesně známa. Odolnost okolnímu prostředí je navíc ovlivňována materiálem podkladu spoje a jeho povrchovou úpravou (protikorozní, primerové (základní) nátěry, mechanické nebo jiné úpravy pro zvýšení přilnavosti) [19]. Z výše uvedeného vyplývá potřeba zkoumat polotuhá lepidla pro jejich použití ve fasádním inženýrství a to včetně jejich odolnosti k okolnímu prostředí.

Předpovědět změnu mechanických vlastností konkrétního lepeného spoje v určitém prostředí je složitý úkol, protože na spoj působí několik degradačních faktorů současně. Spolupůsobení degradačních faktorů (např. zvýšené teploty a vlhkosti) může způsobit vážnější zhoršení mechanických vlastností než působení každého faktoru zvlášť. Voda a vlhkost jsou považovány za nejvýznamnější degradační činitele, protože voda je polární látka a proniká většinou polymerů (permeabilita). Vyšší teplota urychluje proces difuze, z čehož vyplývá větší poškození během kratší doby [20]. Bobtnání nebylo v tomto článku řešeno. Vlhkost může měnit materiálové vlastnosti polymeru, který se vlivem snížené teploty skelného přechodu stává měkkší. Obsah vody v polymeru vede k objemovým změnám, ke kterému jsou podle [19] více náchylné polymery s nižším modulem pružnosti. Když polymer vyschne, jsou účinky obou těchto procesů vratné. Vlivem dlouhodobého působení vlhkosti za vyšších teplot dochází k hydrolyze, která působí trvalé zhoršení mechanických vlastností, to často vede ke kohezivnímu porušení spoje. Jednotlivé skupiny používaných polymerních lepidel jsou vždy různě citlivé k hydrolyze. Obecně lze však říci, že akrylátová lepidla jsou k hydrolyze náchylnější než lepidla na bázi silikonů. V tomto příspěvku nebyla zkoumána náchylnost ani jednoho z použitých lepidel k hydrolyze. Komplexní srovnávací FT-IR analýzy obou stárnoucích lepidel budou řešeny v následujících výzkumných pracích. Vlhkost má také vážný vliv na rozhraní lepidla a podkladu. Molekuly vody, které pronikají do struktury polymeru, mají tendenci se přednostně pohybovat k rozhraní, kde mají vliv na adhezní spojení mezi lepidlem a podkladem. Proto, při krátkodobém působení vlhkosti na spoj je typický adhezivní způsob porušení. Odolnost vůči působení vlhkosti lze zvýšit lepší odolností rozhraní (např. povrchové protikorozní nátěry, primerové (základní) nátěry a chemické ošetření povrchu podkladového kovu k dosažení vyšší adheze) [19].

V případě adsorpce NaCl na povrch kovu před aplikací polymerního lepidla může dojít ke urychlení případné hydrolyzy. Neboť dojde ke zvýšení permeability lepidla pro vodu (vliv osmózy) a následný vznik osmotických puchýřů a snížení odolnosti spoje [21-23]. Předložený příspěvek se zabývá experimentální analýzou lepených spojů pro užití v lehkých obvodových pláštích budov. Do výzkumu byla vybrána dvě různá lepidla, která byla aplikována ve dvojité přepletovaném lepeném spoji. Studie zahrnuje dva různé podkladové materiály, hliník a galvanicky zinkovanou ocel s hladkým nebo mechanicky zdrsňeným povrchem. Cílem studie je stanovení mechanických charakteristik spoje v závislosti na použitém lepidlu a materiálu podkladu včetně jeho povrchové úpravy a porovnání mechanických vlastností a způsobu porušení pro spoje vystavené a nevystavené laboratornímu stárnutí v atmosféře umělé solné mlhy.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Lepidla vybraná do studie byla zvolena na základě jejich možného použití v plošném spoji v lehkém obvodovém plášti. Nosný lepený spoj LOP musí být dostatečně tuhý a únosný, tak aby zajistil spolupůsobení obou prvků konstrukce a umožnil tak přenos zatížení z panelu opláštění do nosné konstrukce pláště. Ale současně by měl být také do jisté míry poddajný, aby nevznikaly nežádoucí koncentrace napětí ve spoji (např. na koncích přelátovaného spoje, kde se v případě tuhých lepidel koncentrace napětí vyskytují) a aby v případě spojování materiálů s rozdílnou teplotní délkovou roztažností byl spoj schopen vyrovnat rozdílné teplotní deformace obou prvků. Toho lze dosáhnout použitím vhodného lepidla na konkrétní přípoj aplikovaného v optimální tloušťce. Vzhledem k výše popsaným požadavkům na nosný lepený spoj byla do studie vybrána dvě různá lepidla a to dle jejich mechanických vlastností a odolnosti okolnímu prostředí.

Jednosložkové strukturální lepidlo na bázi Silane Terminated Polymer (STP) technologii, kombinuje vlastnosti lepidel na bázi polyuretanu a silikonu. Tento hybridní elastomer ale ve srovnání se silikony dosahuje vyšších pevností; výrobce lepidla uvádí pevnost v tahu 3 MPa (zkouška dle ISO 37) a pevnost ve smyku 2 MPa (zkouška dle ISO 4587). Vytvrzuje reakcí se vzdušnou vlhkostí v lepidlo odolné vůči UV, povětrnosti a stárnutí, které je vhodné pro strukturální spoje. Lepidlo na bázi STP technologie se aplikuje v optimální tloušťce několik mm, proto může být užito i v případě nutnosti vyrovnání tolerancí, a vzhledem k nízkému modulu pružnosti snadněji vyrovná koncentrace napětí. Proto je vhodné pro lineární, dynamicky zatížené spoje a současně může plnit další funkce lepidel jako je těsnění nebo útlum přenosu hluku mezi spojovanými částmi. Teplota skelného přechodu T_g je cca $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lepidlo na bázi STP technologie je navrženo jako systém s redukovanou přípravou povrchů (není nutné užití primeru – základního nátěru) což je žádoucí právě při použití ve spoji obvodových plášťů budov, kde tato technologie urychluje montáž.

Lepidlo na bázi akrylátu je dvojsložkové rychle vytvrzující systém vhodný pro konstrukční lepení. Toto polotuhé lepidlo dosahuje vyšších pevností, tj. cca 10 MPa (zkouška dle ISO 37) dle technického listu, při zachování dostatečné míry poddajnosti. Aplikuje se v optimální tloušťce 0,5 až 3 mm, proto může být využito i pro vyplnění nerovností a vyrovnání tolerancí až do 3 mm. Teplota skelného přechodu T_g je cca $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dle technického listu je vhodné na lepení širokého spektra podkladů včetně hliníku, galvanicky zinkované oceli a skla s minimální přípravou povrchu.

Materiál podkladu a jeho příprava mají velký vliv na adhezi a tak na pevnost spoje, ale také na způsob porušení, chování při zatížení, bezpečnost a odolnost

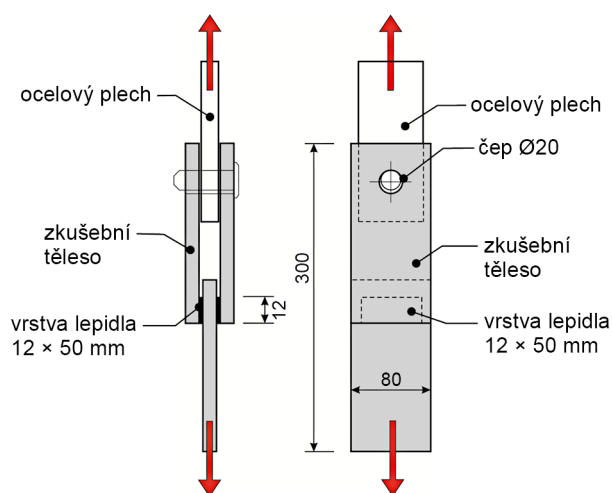
vůči povětrnostním podmínkám (zejména vlhkosti) a stárnutí. S ohledem na konkrétní vybrané lepidlo, použití lepeného spoje na vnějších fasádách i v podobných aplikacích v interiéru má podstatný vliv na výběr materiálu podkladu. Proto do studie byly zahrnuty materiály, které se velmi často v těchto případech používají – hliníkové slitiny AlMgSi0,5 a AlMg1 a galvanicky zinkovaná ocel. V případech, kde je prvek vystaven účinkům vnějšího prostředí, je často používána žárově zinkovaná ocel. Nicméně rozdíl v chemickém složení vnější vrstvy povlaku žárového zinku a povlaku galvanického zinku je obvykle zanedbatelný (viz výše). Vzhledem k tomu, že eloxování je často používaná povrchová úprava prvků z hliníku chránící před účinky povětrnosti a eloxovaný povrch může ovlivnit adhezi lepidla k povrchu, byla hliníková slitina AlMgSi0,5 zahrnuta do studie také s anodizovaným povrchem. Protože také drsnost povrchu podkladu má vliv na adhezi a odolnost spoje proti stárnutí [19, 20], hliník i zinkovaná ocel byly ve zkušebních tělesech použity s hladkým (a očištěným, odmaštěným a aktivovaným) povrchem a s povrchem mechanicky zdrsňeným pomocí drátěnky ScotchBrite. Povrch očištěný, odmaštěný a aktivovaný se zdrsňeným povrchem je doporučován výrobcem lepidla. Nicméně zdrsňení povrchu je další technologický krok, který musí být při realizaci fasády dodržen a to zvyšuje pracnost a náklady. Z tohoto důvodu byly do výzkumu také zařazeny vzorky s hladkým povrchem tak, aby vliv drsnosti povrchu na adhezi bylo možné vyhodnotit i včetně vlivu vnějšího prostředí. Zkušební tělesa byla připravena vždy po pěti kusech pro každou skupinu materiálu, povrchovou úpravu a pro každé lepidlo. Zkušební tělesa byla připravena ve dvou sériích, jedna série referenční, tj. vzorků nevystavených laboratornímu stárnutí, a druhá série vzorků pro vystavení podmínkám neutrálního solného mlhy dle ČSN en ISO 9142 [24], viz Tab. 1.

Tab. 1. Přehled zkušebních těles pro jedno lepidlo, různé podklady a různé povrchové úpravy / *Summary of all testing specimens for one type of adhesive, various substrates and surface treatments*

Podklad	Povrch	Referenční série	ISO 9142 NSS test
		počet vzorků	počet vzorků
hliník	hladký	5	5
	zdrsňený	5	5
eloxovaný hliník	hladký	5	5
pozinkovaná ocel	hladký	5	5
	zdrsňený	5	5

Zkušební tělesa byla vyrobena jako dvojité přelátované lepený spoj tak, aby bylo eliminováno případné namáhání od excentricky vnášeného zatížení, které vzniká při uspořádání označovaném jednoduchý

přeplátovaný spoj. Smykem namáhaný spoj je vzhledem ke své dobré proveditelnosti i v případě velkých lepených ploch velmi výhodný typ geometrického uspořádání. Lepidlo bylo ve spojích aplikováno na ploše $2 \times 12 \times 50$ mm, kde délka přeplátování spoje byla 2 mm, viz schéma na Obr. 1. V případě zkušebních těles z hliníkových slitin, střední díl zkušební tělesa byl vyroben z AlMgSi0,5 a boční díly ze slitiny AlMg1.



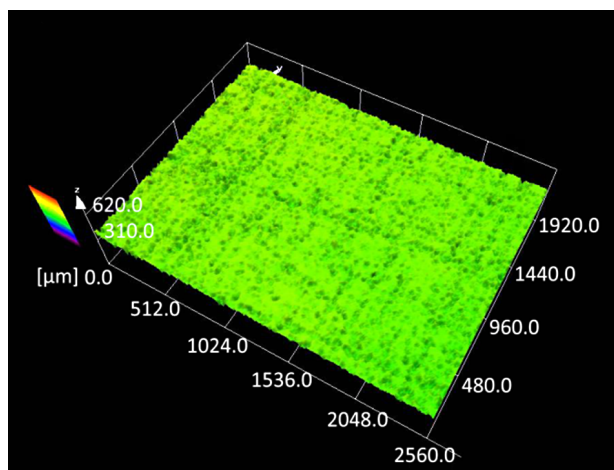
Obr. 1. Schéma zkoušek dvojité přeplátovaného lepeného spoje namáhaného smykem

Fig. 1. Scheme of double lap shear specimen

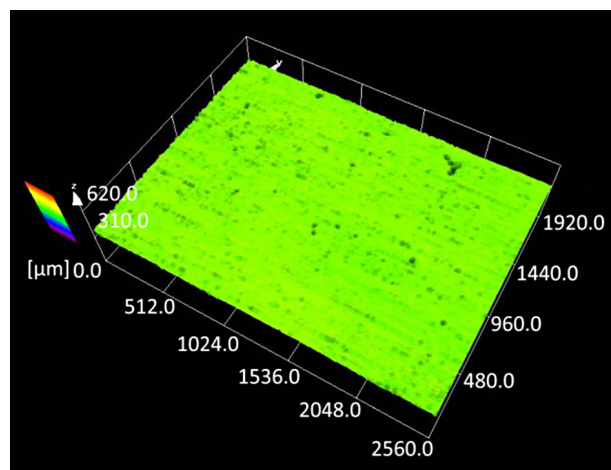
Mohl tak být vyhodnocen vliv materiálu hliníkové slitiny na adhezi lepidla k podkladu a způsob porušení spoje (adhezně od podkladu AlMg1 nebo adhezně od podkladu AlMgSi0,5, případně kohezně uvnitř vrstvy lepidla). Průměrná tloušťka vrstvy lepidla u zkušebních těles s lepidlem na bázi akrylátu byla 0,8 mm a 4,99 mm pro lepidlo na bázi STP technologie. Obě použité tloušťky vrstvy lepidla jsou v souladu s doporučenou optimální tloušťkou pro dané lepidlo udávané výrobcem.

Pro vyvození smykového namáhání ve vrstvě lepidla bylo zkušební těleso zatíženo tahovou silou, dle schématu na Obr. 1. Spoj byl zatěžován kontrolou deformací 1 mm/min v případě lepidla na bázi akrylátu a 5 mm/min v případě lepidla na bázi STP technologie tak, aby byla v obou případech stejná rychlost inženýrské smykové deformace vrstvy lepidla. Měřena byla působící síla a odpovídající deformace každého spoje snímaly dva potenciometrické snímače, tedy čtyři snímače na jedno zkušební těleso. Pro vyhodnocení výsledků byla použita průměrná hodnota deformace.

Jak bylo zmíněno výše, drsnost povrchu může mít vliv na adhezi lepidla k podkladu. Z tohoto důvodu, byla provedena analýza drsnosti povrchu pro oba druhy materiálů včetně jejich povrchových úprav. Měření drsnosti bylo provedeno za použití optického mikroskopu Olympus LEXT OLS 3000. Aritmetická střední výška R_a (respektive střední aritmetická úchylka profilu) a maximální výška drsnosti R_z jsou shrnuty v Tab. 2.



a) zdrsňený povrch / roughened surface



b) hladký povrch / smooth surface

Obr. 2. Struktura povrchu hliníku na ploše $2560 \times 1920 \mu\text{m}$, zvětšení $120\times$

Fig. 2. Surface topography of aluminum substrate on area $2560 \times 1920 \mu\text{m}$, zoom 120 times

Tab. 2. Parametry analýzy drsnosti pro všechny druhy podkladů / Roughness analysis parameters for all types of substrates

	Zinkovaná ocel, hladký povrch	Zinkovaná ocel, zdrsňený povrch	Eloxovaný hliník	Hliník, hladký povrch	Hliník, zdrsňený povrch
$R_a [\mu\text{m}]$	3,4	10,6	5,8	3,5	6,0
$R_z [\mu\text{m}]$	121,5	157,8	183,3	113,0	113,4

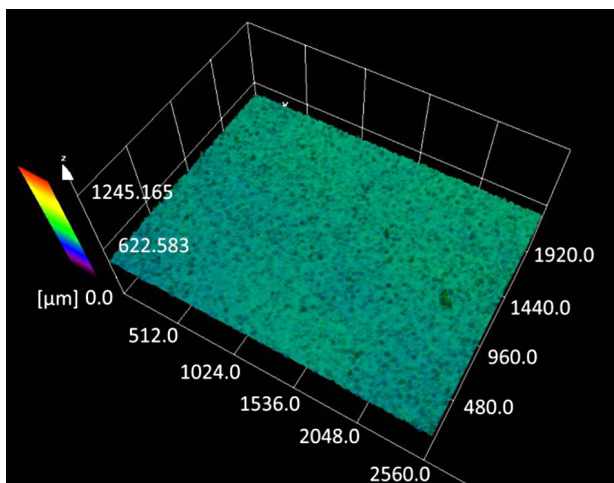
Struktura povrchů všech typů podkladu je znázorněna na Obr. 3-5, kde zobrazená plocha odpovídá ploše $2560 \times 1920 \mu\text{m}$ a zvětšení $120\times$. Rozdíly v drsnosti povrchu (reprezentováno $R_a [\mu\text{m}]$) jsou poměrně malé. Největší drsnost vykazuje zinkovaná ocel, zdrsňený povrch, kde drsnost povrchu je přibližně 2krát větší než u ostatních povrchů.

Laboratorní stárnutí v atmosféře umělé mlhy

Pro stanovení vlivu slané (např. přímořského) prostředí byla jedna série zkušebních těles vystavena podmínkám neutrální solné mlhy a zvýšené teplotě a vlhkosti podle ČSN EN ISO 9142, Postup E4 [24]. V první fázi byly vzorky vystaveny neutrální solné mlze (NSS) za teploty 35°C dle podmínek uvedených v ČSN EN ISO 9227 po dobu 21 dní, viz Obr. 5. Po té byla zkušební



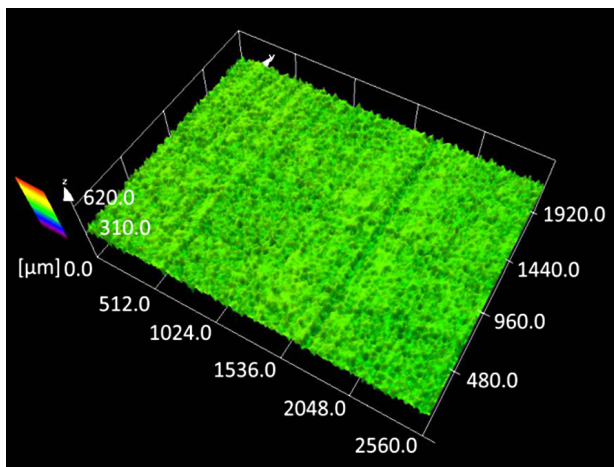
Obr. 5. Zkušební tělesa v korozní komoře
Fig. 5. Specimens in corrosive test chamber



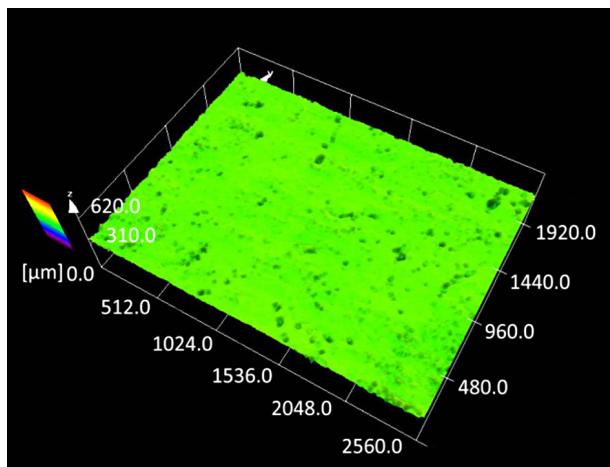
Obr. 3. Struktura povrchu eloxovaného hliníku na ploše $2560 \times 1920 \mu\text{m}$, zvětšení $120\times$
Fig. 3. Surface topography of anodized aluminum substrate on area $2560 \times 1920 \mu\text{m}$, zoom 120 times



Obr. 6. Zkušební těleso před NSS a po 21 dnech v podmínkách NSS
Fig. 6. Specimen before neutral salt spray (NSS) test and after 21 days in NSS conditions



a) zdrsňený povrch / roughened surface



b) hladký povrch / smooth surface

Obr. 4. Struktura povrchu zinkované oceli na ploše $2560 \times 1920 \mu\text{m}$, zvětšení $120\times$
Fig. 4. Surface topography of zinc-electroplated steel substrate on area $2560 \times 1920 \mu\text{m}$, zoom 120 times

tělesa přemístěna do klimatické komory, kde po dobu dalších 7 dní byla exponována 95% relativní vlhkosti a teplotě 40 °C. Před provedením zkoušek mechanických vlastností (viz popis výše) byly vzorky po následujících 10 dní kondicionovány za podmínek pokojové teploty a vlhkosti (21 °C a 40% relativní vlhkosti).

VÝSLEDKY A DISKUZE

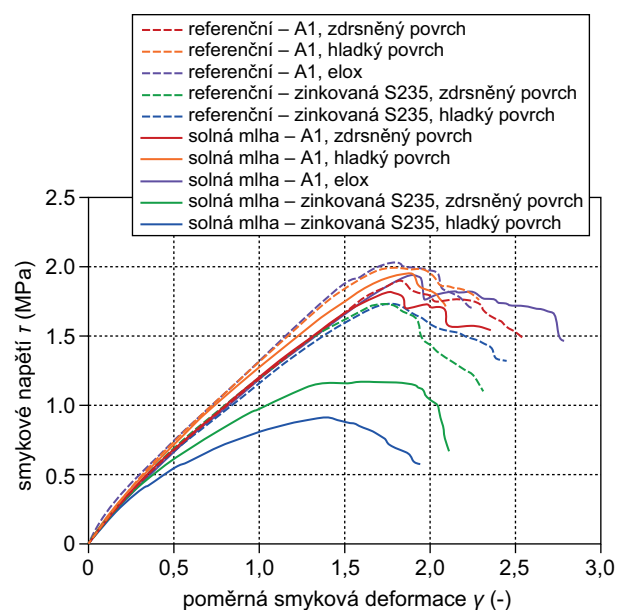
Lepidlo na bázi STP technologie

Pro vzájemné porovnání chování jednotlivých typů spojů i obou sérií (vystavených a nevystavených laboratornímu stárnutí) během mechanického zatěžování byl zpracován souhrnný diagram závislosti napětí na smykové ploše na poměrném přetvoření, který je zobrazen na Obr. 7. Pracovní diagram zahrnuje reprezentativní křivky vzorků, které byly z každé skupiny vybrány tak, aby odpovídaly průměrným hodnotám výsledků zkoušek. Tab. 3 pak poskytuje porovnání naměřených průměrných hodnot maximálního smykového napětí na ploše a způsob porušení spoje pro obě série zkušebních těles, kde A je adhezní, K je kohezní, A-K je kombinovaný způsob porušení spoje a v tomto případě písmeno zvýrazněné tučně znamená převládající způsob porušení.

Referenční sada zkušebních těles s lepidlem na bázi STP technologie dosáhla průměrných hodnot smykového napětí mezi 1,7 a 1,9 MPa při relativním smykovém přetvoření 1,8 (hodnoty jsou udávány jako inženýrská smyková deformace). Podobné hodnoty byly pozorovány pro všechny typy spoje všech typů podkladu bez rozdílu, zda šlo o zdrsňenou či nezdrsňenou kontaktní plochu podkladu. Lepidlo na bázi STP technologie prokázalo velmi dobrou přilnavost ke všem zkoušeným podkladům. Všechna zkušební tělesa byla porušena kohezním způsobem porušení. Typický způsob porušení této série je znázorněn na Obr. 8a,b.

Expozice neutrální solné mlže způsobila viditelné změny ve způsobu porušení spojů i přesto, že v případě hliníkového podkladu průměrné hodnoty maximálních naměřených smykových napětí byly velmi podobné

výsledkům referenční sady, viz Tab. 3. Výrazné snížení hodnot smykových napětí bylo pozorováno pouze u zkušebních těles se zinkovanou ocelí, kde lepidlo dosahovalo o 30-50% nižší smykové pevnosti než u stejných vzorků referenční sady. Dosažené poměrné přetvoření bylo podobné jako u vzorků referenční série; pohybovalo se od 1,6 pro zinkovanou ocel do 1,8 pro hliníkové podklady. U většiny zkušebních těles byl čistě kohezní způsob porušení referenční série zkušebních těles změněn na kombinovaný adhezně-kohezní způsob s převládajícím kohezním porušení v případě hliníkových podkladů. Typický způsob porušení je zobrazen na Obr. 8c,d. Na obou fotografiích je pozorovatelná postupná degradace spoje a adhezního spojení mezi polymerem a pod-



Obr. 7. Pracovní diagram lepidla na bázi STP technologie – porovnání referenční sady vzorků (čárkovaná čára) se vzorky vystavenými solné mlže (plná čára)

Fig. 7. Stress-strain diagram for silane terminated polymer (STP) adhesive - a comparison of reference set of specimens (dashed line) and NSS set of specimens (continuous line)

Tab. 3. Průměrné hodnoty max. smykového napětí a způsoby porušení pro lepidlo na bázi STP technologie / Average values of shear strength and failure modes for STP adhesive

Typ zkušebního tělesa (podklad / povrch, úprava)	Referenční série			Solná mlha (ISO 9142)		
	prům. hodnota max. smyk. napětí [MPa]	směr. odchylka	způsob porušení	prům. hodnota max. smyk. napětí [MPa]	směr. odchylka	způsob porušení
hliník / zdrsňený povrch	1,87	0,13	K	1,82	0,08	A-K
hliník / hladký povrch	1,89	0,19	K	1,93	0,08	A-K
eloxovaný hliník	1,87	0,18	K	1,95	0,07	A-K
zink. ocel / zdrsňený povrch	1,69	0,12	K	1,15	0,14	A-K
zink. ocel / hladký povrch	1,72	0,11	K	0,84	0,15	A-K

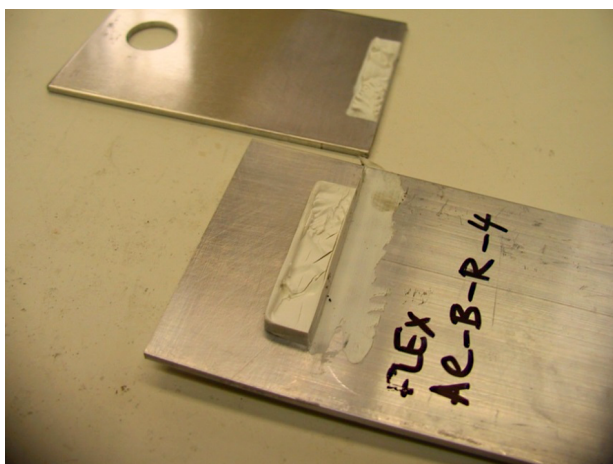
kladem po obvodě vrstvy lepidla. Tento efekt působení prostředí NSS je více rozsáhlý v oblastech, kde přímo působila solná mlha. Větší zasažená plocha spoje je také viditelná u vzorků ze zinkované oceli než u hliníkových podkladů. Lze předpokládat, že v případě delšího působení prostředí NSS by se celý spoj porušil adhezně.

Rozdíl v adhezi obou použitých hliníkových slitin nebyl znatelný v případě referenční sady zkušebních vzorků, kdy spoj se vždy porušil kohezním způsobem. Po vystavení vzorků účinkům NSS byla pozorována nižší přilnavost ke slitině bočních dílů AlMg1, kdy k částečné adheznímu porušení docházelo převážně od bočních dílů.

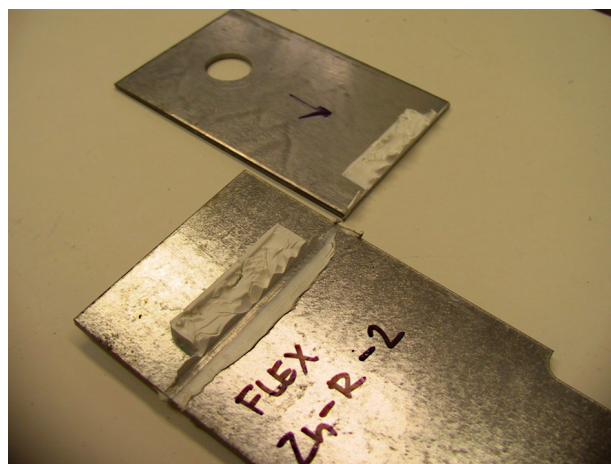
Lepidlo na bázi akrylátu

Podobně jako u vzorků s lepidlem na bázi STP technologie, je na Obr. 9 zobrazen souhrnný pracovní diagram zahrnující obě série zkušebních těles pro všechny zkoušené kovové podklady a jejich povrchové úpravy. Porovnání výsledků včetně způsobu porušení spojů je shrnuto v Tab. 4, kde A je adhezní, K je kohezní, A-K je kombinovaný způsob porušení spoje a v tomto případě písmeno zvýrazněné tučně znamená převládající způsob porušení.

Referenční sada vzorků lepidla na bázi akrylátu a hliníkového podkladu se zdrsňeným povrchem dosáhla průměrné hodnoty maximálního smykového napětí 9,2 MPa. Pro ostatní druhy podkladů a povrchových úprav dosahovalo toto lepidlo menších smykových pevností,



a) hliník – zdrsňený povrch / aluminum – roughened surface



b) zinkovaná ocel – hladký povrch / zinc-electroplated steel – smooth surface



c) hliník – hladký povrch / aluminum – smooth surface

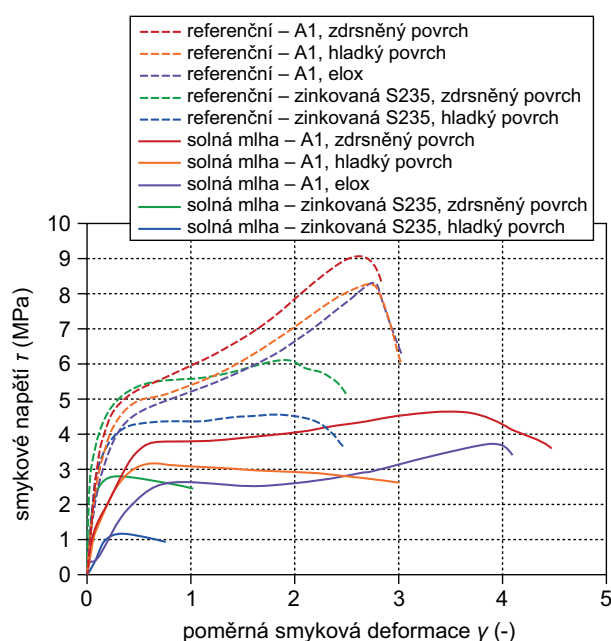


d) zinkovaná ocel – zdrsňený povrch / zinc-electroplated steel – roughened surface

Obr. 8. Způsob porušení lepidla na bázi STP technologie: a) hliník – zdrsňený povrch, referenční sada zk. těles; b) zinkovaná ocel – hladký povrch, referenční sada zk. těles; c) hliník – hladký povrch, solná mlha; d) zinkovaná ocel – zdrsňený povrch, solná mlha

Fig. 8. Failure modes of STP adhesive: a) aluminum - roughened surface, reference set of specimens; b) zinc-electroplated steel - smooth surface, reference set of specimens; c) aluminum - smooth surface, NSS test; d) zinc-electroplated steel - roughened surface, NSS test

viz Tab. 4 a graf na Obr. 9. Výsledky experimentální analýzy prokázaly významný vliv podkladového materiálu i mechanického zdrsnění povrchu, které mělo pozitivní efekt na dosažené maximální hodnoty smykového napětí jak pro zinkovanou ocel, tak pro hliníkové podklady. Zkušební tělesa lepidla na bázi akrylátu s hliníkovým podkladem byla ve většině případů porušena kohezním způsobem porušení nebo kombinovaným způsobem s převládajícím kohezním způsobem. V případě zkušebních těles se zinkovanou ocelí byla zkušební tělesa porušena kombinovaným způsobem s převládajícím adhezním porušením a nedostatečná adheze lepidla k podkladu se projevila také na naměřených nižších hodnotách smykového napětí, než tomu



Obr. 9. Pracovní diagram lepidla na bázi akrylátu – porovnávací referenční sady vzorků (čárkovaná čára) se vzorky vystavenými solné mlze (plná čára)

Fig. 9. Stress-strain diagram for acrylate-based adhesive – a comparison of reference set of specimens (dashed line) and specimens exposed to NSS test (continuous line)

bylo u hliníkových podkladů. Typický způsob porušení pro oba materiály podkladu je znázorněn na Obr. 10a,b. Podobný pokles pevnosti lepidla na bázi akrylátů ve spoji s galvanicky pokovenou ocelí popisuje Damico v [25] pro „první generaci“ akrylátových lepidel, které jsou stále na trhu. Dále uvádí, že „druhá generace“ těchto lepidel stále vykazuje určitá slabá místa v lepení galvanicky pokovených povrchů. Lze očekávat, že z akrylátových lepidel se mohou vlivem hydrolyzy uvolňovat krátké řetězce karboxylových kyselin, které mohou naleptávat povrch zinkového povlaku a obecně zhoršovat přídržnost lepeného spoje ke kovovému povrchu.

Na rozdíl od lepidla na bázi STP technologie, byl v případě akrylátového lepidla pozorován rozdíl v přílnavosti k oběma použitým hliníkovým slitinám. V referenční sadě vzorků s hladkým povrchem docházelo k částečné adheznímu porušení převážně od středního plechu, tedy slitiny AlMgSi0,5.

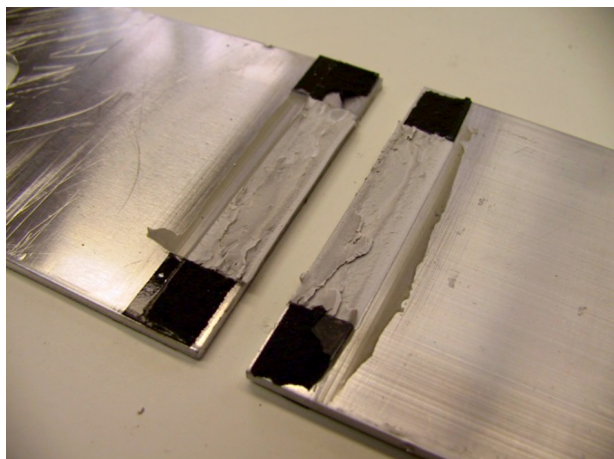
Expozice neutrální solné mlže způsobila velmi výrazný pokles jak smykové pevnosti (o 50 až 60% v případě hliníkových podkladů a o 60 až 70% v případě zinkované oceli), tak smykového modulu lepidla pro všechny typy podkladů, viz graf na Obr. 9. Většina zkušebních těles eloxovaného hliníku a zinkované oceli s hladkým povrchem byla porušena adhezním způsobem porušení. Ostatní typy spojů byly porušeny kombinovaným způsobem s převládajícím adhezním způsobem porušení, viz Tab. 4. Typický způsob porušení je znázorněn na Obr. 10c,d. Rozdíl v adhezi obou použitých hliníkových slitin nebyl po vystavení podmínkám NSS znatelný – k částečné adheznímu porušení docházelo u obou slitin.

Vliv neutrální solné mlhy na lepený spoj

Během experimentální analýzy bylo pozorováno zhoršení mechanických vlastností lepeného spoje po expozici solné mlhy dle ISO 9142, Postup E4. Obě vybraná lepidla prokázala jiný stupeň zhoršení mechanických vlastností a to také v závislosti na volbě materiálu podkladu.

Tab. 4. Průměrné smykové pevnosti a způsoby porušení pro zkušební tělesa z lepidla na bázi akrylátu / Average values of shear strength and failure modes for acrylate-based adhesive specimens

Typ zkušebního tělesa (podklad / povrch, úprava)	Referenční série			Solná mlha (ISO 9142)		
	prům. hodnota max. smyk. napětí [MPa]	směr. odchylka	způsob porušení	prům. hodnota max. smyk. napětí [MPa]	směr. odchylka	způsob porušení
hliník / zdrsňený povrch	9,3	0,66	K	4,84	1,51	A-K
hliník / hladký povrch	8,43	0,87	A-K	3,36	0,50	A-K
eloxovaný hliník	8,47	0,63	K	3,48	0,46	A
zink. ocel / zdrsňený povrch	6,24	1,18	A-K	2,48	0,38	A-K
zink. ocel / hladký povrch	4,68	0,79	A-K	1,27	0,54	A



a) hliník – zdrsňený povrch / aluminum – roughened surface



b) zinkovaná ocel – zdrsňený povrch / zinc-electroplated steel – roughened surface



c) hliník – hladký povrch / aluminum – smooth surface



d) zinkovaná ocel – hladký povrch / zinc-electroplated steel – smooth surface

Obr. 10. Způsob porušení akrylátového lepidla: a) hliník – zdrsňený povrch, referenční sada zk. těles; b) zinkovaná ocel – zdrsňený povrch, referenční sada zk. těles; c) hliník – hladký povrch, solná mlha; d) zinkovaná ocel – hladký povrch, solná mlha

Fig. 10. Failure modes of acrylate-based adhesive: a) aluminum – roughened surface, reference set of specimens; b) zinc-electroplated steel – roughened surface, reference set of specimens; c) aluminum – smooth surface, NSS test; d) zinc-electroplated steel – smooth surface, NSS test

Lepidlo na bázi STP technologie po vystavení NSS po dobu 3 týdnů a 95% relativní vlhkosti a teplotě 40 °C do dalších 7 dní, neprokázalo téměř žádné zhoršení mechanických vlastností u vzorků lepených s podklady z hliníkových slitin. Naopak, u spojů s galvanicky zinkovanou ocelí byl pokles smykové pevnosti o 31 % pro zdrsňený povrch a 51 % pro hladký povrch podkladu. U těchto zkušebních těles byl také pozorován nižší smykový modul. U všech druhů spojů lepidla na bázi STP technologie byla pozorována výrazná změna přilnavosti lepidla k podkladu způsobená expozicí solné mlhy. Lze předpokládat, že tato zóna s redukovanou adhezí k podkladu by se po delším čase expozice rozšířila směrem ke středu vrstvy lepidla a vedla tak ke kombinovanému porušení spoje s převládajícím adhezním způsobem porušení, případně k čistému adheznímu porušení.

Expozice NSS měla více degradující účinek pro lepidlo na bázi akrylátu, zejména pokud jde o spoje s hliníkovými podklady, kde pevnost lepidla ve smyku poklesla o 47 % pro zdrsňený povrch a 60 % pro hladký povrch podkladu a 58 % pro eloxovaný hliník. Pro spoje s galvanicky zinkovaným podkladem byl pozorován podobný úbytek pevnosti ve smyku, 60 % pro zdrsňený povrch a 70 % pro hladký kontaktní povrch. Z pracovních diagramů lepidla je kromě poklesu pevnosti ve smyku také znatelné snížení smykového modulu jako velmi pravděpodobný následek zvýšeného objemu vody ve struktuře polymeru a tedy snížené teploty skelného přechodu [19].

Dále lze konstatovat, že odolnost expozici NSS je vyšší u spojů z hliníkových slitin než u spojů ze zinkované oceli a zdrsňení povrchu kontaktní plochy podkladu

má pozitivní vliv na přílnavost lepidla a na odolnost spoje vůči expozici NSS a to zejména u lepidla na bázi akrylátu, kde tento pozitivní vliv zdrsnění povrchu byl pozorován u obou druhů materiálu podkladu.

ZÁVĚR

Tento článek byl zaměřen na vyhodnocení vlivu expozice neutrální solné mlhy dle ISO 9142, Postupu E4 na mechanické vlastnosti nosných lepených spojů. Studie také posuzuje vliv podkladu lepeného spoje a jeho povrchové úpravy na mechanické vlastnosti spoje. Z experimentální analýzy byly vyvozeny následující závěry:

- zdrsnění povrchu podkladu zvýšilo adhezi vybraných lepidel k podkladu, zejména lepidla na bázi akrylátu;
- spoje se podkladem z hliníkových slitin měli vyšší odolnost vůči expozici NSS než spoje s galvanicky zinkovanou ocelí;
- slitina AlMgSi0,5 použitá na střední díl zkušebních těles vykazovala horší adhezi v případě lepidla na bázi akrylátu v referenční sérii těles (nevystavených laboratornímu stárnutí);
- naopak, slitina AlMgSi0,5 s lepidlem na bázi STP technologie vykazovala lepší přílnavost lepidla po vystavení účinkům NSS, v případě zkušebních těles s akrylátovým lepidlem obě použité hliníkové slitiny vykazovaly srovnatelné výsledky;
- u všech druhů podkladů a lepidla na bázi STP technologie bylo viditelné působení NSS po okrajích vrstvy lepidla, které způsobilo částečné adhezí porušení;
- expozice NSS měla u lepených spojů se zinkovanou ocelí a lepidlem na bázi STP technologie významný vliv na mechanické vlastnosti;
- galvanicky zinkovaná ocel se prokázala jako málo vhodný materiál podkladu v případě lepidla na bázi akrylátu a to jak pro sérii vystavenou účinkům laboratorního stárnutí, tak pro referenční sérii;
- expozice NSS způsobila výrazné zhoršení mechanických vlastností ve spojích s lepidlem na bázi akrylátu u všech typů podkladu a povrchových úprav.

Bylo prokázáno, že odolnost lepeného spoje vůči působení okolního prostředí a stárnutí je závislá jak na chemickém složení, tak na materiálu podkladu včetně jeho povrchové úpravy. Zkušební tělesa byla vystavena účinkům urychleného laboratorního stárnutí v podmínkách NSS, nicméně porovnání se skutečným účinkem přímořského prostředí je pro aplikace ve stavebnictví velmi důležitým dalším krokem, protože lepený spoj na fasádě musí plnit svoji funkci mnohem delší dobu než např. spoj v automobilovém nebo leteckém průmyslu. Expozice lepených spojů skutečným

environmentálním podmínkám a porovnání s účinky laboratorního stárnutí budou další nedílnou etapou tohoto výzkumu.

Poděkování

Tento příspěvek byl zpracován za podpory projektu COST LD15078. Dále děkujeme Dr. Kreislové ze SVÚOM, s.r.o za realizaci korozních zkoušek lepených kovových materiálů v neutrální solné mlze. Dále děkujeme Jakubovi Vršťalovi ze Sipral, a.s. za praktické rady a připomínky.

LITERATURA

1. Michna, Š. et al. *Encyklopedie hliníku*, 1st ed., Adin : Prešov, 2005.
2. Hluchý, M. Kolouch, J. *Strojírenská technologie 1 (Nauka o materiálu – 1. díl)*, 4th ed., Scientia : Praha, 2007.
3. Ptáček, L. et al. *Nauka o materiálu II*, 4th ed., CERM : Praha, 2007.
4. ČSN EN ISO 9223: Korozní agresivita atmosfér – Klasifikace, stanovení a odhad
5. Frischeherz, A. et al. *Technologie zpracování kovů 1 – Základní poznatky*, 3th ed., SNTL: Praha, 2004.
6. Lumley R. et al. *Foundamentals of Aluminium Metalurgy (Production, Processing and Applications)*, 1st ed., Elsevier Science : London, 2010.
7. Vargel C. et al. *Corrosion of Aluminium*, 1st ed., Elsevier Science : Oxford, 2004.
8. Vojtěch, D. et al. *Kovové materiály*, 1st ed., VŠCHT Praha : Praha, 2006.
9. Kuklík, V. Kudláček, J. *Žárové zinkování*, 1st ed., AČSZ : Havlíčkův Brod, 2014.
10. Pokorný, P. et al. Description of structure of Fe–Zn inter-metallic compounds present in hot-dip galvanized coatings on steel, *Metalurgija* **2015**, 54 (4), 707-710.
11. Kuklík, V. *Metalurgie tvorby povlaku žárového zinku*, *Tribotechnika* **2014**, 6(1), 38-41.
12. Marder, A. R. The metallurgy of zinc-coated steel, *Progress in Materials Science* **2000**, 45, 191-271.
13. Shibli, S.M.A. et al. A review on recent approaches in the field of hot dip zinc galvanizing process, *Surface and Coating Technology* **2008**, 262, 210-215.
14. Bicao, P. et al. Effects of zinc bath temperature on the coatings of hot-dip galvanizing, *Surface and Coating Technology* **2008**, 202, 1785-1788.
15. Cyrus, Z. et al. Kurz galvanizérů I. (skriptum), VŠB-TU Ostrava, 1996.
16. Dettner, H. et al. *Handbuch der galvanotechnik-band III*, Carl Hanser Verlag : München, 1969.
17. Haldimann, M. et al. Structural Engineering Documents. *Structural Use of Glass*, IABSE-AIPC-IVBH ETH Zürich, 2008.
18. O'Regan, Ch. et al. *Structural Use of Glass in buildings*, 2nd ed., The Institution of Structural Engineers, 2015.
19. Petrie, E. M. *Handbook of Adhesives and Sealants*, 2nd ed., McGraw-Hill, 2007.

20. Heshmati, M. et al. Environmental durability of adhesively bonded FRP/steel joints in civil engineering applications: state of the art. *Composites Part B – Engineering* **2015**, 81, 259–275.
21. Fiore, V. et al. Pull-off adhesion of hybrid glass-steel adhesive joints in salt fog environment. *Journal of Adhesion Science and Technology* **2016**, 30, 2157–2174.
22. Wang, C. et al. The durability of adhesive/carbon–carbon composites joints in salt water, *International Journal of Adhesion and Adhesives* **2004**, 24 (6), 471–477.
23. Gao, Y. L. et al., Aging Performance of Epoxy Adhesive in Salt Water, *Advanced Materials Research* **2006**, 11–12, 399–402.
24. ČSN EN ISO 9142: Lepidla – Směrnice k výběru laboratorních podmínek stárnutí pro hodnocení lepených spojů
25. D. J. Damico. Reactive Acrylic Adhesives. *Handbook of Adhesive Technology*. 2nd ed., New York: M. Dekker, 2003, 747–760.