Dokument: SASAK-RAP-LI-AKS-FI-0001-02

Introduktion til Limning af Aluminium

SASAK
Projekt 4 - Limning

Jan Thernøe

Force Instituttet, Maj 2001

Park Allé 345, 2605 Brøndby
Tlf.: 43267000, Fax: 43267011
E-mail: jat@force.dk

Abstract

For at opnå stærke og holdbare limninger på aluminium skal overfladerne forbehandles, så de kan vædes effektivt af limen, og så de bliver mekanisk stærke og modstandsdygtige mod korrosion. Selv med grundig forbehandling kan limsamlinger have en begrænset levetid, særlig hvis de udsættes for fugt og varme, saltvand eller stor mekanisk belastning. Et miljø med flere samtidige belastningsarter reducerer levetiden. Den forventelige levetid i et givet miljø kan i almindelighed kun bestemmes ved afprøvning i praksis, og resultatet er specifikt for den benyttede kombination af aluminiumlegering, forbehandling og limprodukt. Der gives summariske beskrivelser af udvalgte limtyper i forbindelse med aluminium.

Limning af aluminium

Fremstilling af limsamlinger i aluminium, som både er tilstrækkelig stærke og bevarer deres lastbærende egenskaber over lang tid, er en ganske kompleks opgave.

En limet samling kan opfattes som et system bestående af limemnematerialerne - med en given udformning, disses overflader samt lim og eventuel primer. Systemets egenskaber afhænger både af disse elementer, og af omstændighederne ved samlingens tilblivelse: Fremgangsmåde ved forbehandling af overfladerne, miljø og tidsrum mellem forbehandling og limning, tilberedning og påføring af lim og eventuel primer, samt tid, temperatur og tryk ved limens afbinding.

Samlingens holdbarhed ved den efterfølgende anvendelse afhænger desuden af driftsbetingelserne: Belastningens størrelse og art, temperatur, fugtighed og andre kemiske påvirkninger.

Ideelt set burde systemet behandles som et hele, men på grund af kompleksiteten herved gennemgås i stedet nogle forhold omkring de indgående elementer.

Limning af aluminium er meget udførligt behandlet af J. D. Minford i "Handbook of Aluminum Bonding Technology and Data" [1], som synes at gennemgå de fleste væsentlige originale arbejder på området igennem de seneste 30 år. En oversigt over problemstillingerne samt state of the art kan således meget hensigtsmæssigt gives ved henvisninger hertil, idet værket tillige udgør en omfattende bibliografi på området.

Grundlæggende om limning

Enhver limning beror på en vædning af den faste overflade med lim, så der opstår intim molekylær kontakt mellem lim og overflade. En passende ru struktur på overfladen, som giver mulighed for mekanisk forankring, kan bidrage yderligere til styrken, forudsat at effektiv

vædning stadig er mulig. For at kunne væde en overflade skal limens overfladespænding være lavere end den faste overflades, og desuden skal limen have sådanne flydeegenskaber, at den kan nå at trænge ind i alle de mikroskopiske porøsiteter, som findes i den faste overflade.

Jo lavere molekylvægt limpolymeren har, des lettere kan den væde overfladen, alt andet lige, men lav molekylvægt harmonerer dårligt med en høj limstyrke. Man er allerede af den grund nødt til at forbehandle de faste overflader, så de kan vædes med praktisk anvendelige lime.

Den ideelle overflade har en velegnet struktur, som tillader limmolekylerne at væde den overalt, og som samtidig giver nogen mekanisk forankring. Den er ikke forurenet med stoffer, som kan forhindre intim kontakt med limen på noget sted, og den er mekanisk stærk, så der ikke opstår brud i den ved lastoverføringen, og endelig er den korrosionsstabil, så den bevarer sine egenskaber gennem hele samlingens designlevetid.

Limsamlingers styrke

Det er vigtigt at sondre mellem limingens begyndelsesstyrke og dens langtidsstyrke. En høj begyndelsesstyrke er ikke nødvendigvis ensbetydende med, at samlingen også bevarer styrken i lang tid i et givet miljø.

I mange undersøgelser i 1960erne og 1970erne blev begyndelsesstyrken af limsamlingerne desværre benyttet som det eneste kriterium for, hvad der havde væsentlig indflydelse blandt de forhold, som har betydning ved limning af aluminium, og levetidsaspektet trådte dermed i baggrunden. Begyndelsesstyrken alene er et dårligt mål for limsamlingens egenskaber, fordi samlinger med samme begyndelsesstyrke kan have meget forskellig levetid under klimabelastning.

I almindelighed kan man rangordne eksponeringsmiljøer efter faldende aggressivitet som kystatmosfære > jungleatmosfære > industriatmosfære > landzoneatmosfære > ørkenatmosfære [2]. En række praktiske eksponeringsforsøg har vist, at selv ubelastede limsamlinger med få undtagelser har tabt hele deres styrke efter otte år i kystatmosfære, mens styrketabet i almindelighed er ganske begrænset efter otte år i industriatmosfære [3].

Kombinationen af eksponering i et aggressivt miljø og mekanisk belastning kan reducere levetiden dramatisk; det er vist eksperimentelt, at samlinger som i ubelastet tilstand tålte fugtig varme igennem måneder eller år, kunne gå itu i løbet af minutter eller timer, når de samtidig blev udsat for mekanisk belastning [4].

Medmindre der er tale om midlertidige fikseringsopgaver, er det nok så vigtigt at sikre sig langtidsholdbarhed under de planlagte driftsbetingelser som ensidigt at fokusere på limens styrke. Problemet er blot, at fabrikantens datablade som regel kun oplyser begyndelsesstyrken, fordi langtidsstyrken afhænger af en mængde forhold.

Man er derfor som hovedregel nødt til selv at foretage eksperimenter til dokumentation, eller i det mindste til indikation, af samlingens holdbarhed.

Forbehandling af overflader

Forbehandling kan deles i fire klasser [5]:

1. Kun overfladisk fedt og smuds fjernes

2. Som ovenfor, plus slibning, efterfulgt af rengøring for smuds fra slibeoperationen.

3. Fjernelse af overfladisk fedt og smuds, plus en speciel kemisk behandling, så der dannes et nyt og mere stabilt oxidlag, efterfulgt af en slutrenseproces, som skal fjerne alle kemiske forureninger og rester fra behandlingen, efterfulgt af en lufttørring af overfladen.

4. Som 3) plus en coating med en speciel primer, som skal sikre maksimal kemisk binding til den valgte lim, og en midlertidig beskyttelse af limfladen indtil limningen udføres.

Ønsker man den bedst mulige langtidsholdbarhed under ekstreme klimaforhold er det uomgængeligt at skabe de bedst mulige forhold for limningen på aluminiumoverfladen [6].

Under visse omstændigheder med lave spændinger og god vædning er der opnået tilfredsstillende levetider efter en klasse 1 forbehandling ved omhyggelig overvågning af behandlingen og brug af en særlig velegnet lim [7].

Brugen af en chromat-phosphat conversion coating efter dampaffedtning giver betydeligt øget bestandighed af limsamlinger i aggressivt miljø [8].

Afbinding af lim ved forhøjet temperatur giver specielt i forbindelse med dampaffedtning som eneste forbehandling en bedre begyndelsesstyrke end afbinding ved rumtemperatur, formentlig fordi limens evne til at væde overfladen øges med forhøjet temperatur. Effekten er ikke så udtalt i forbindelse med forbehandlinger, som skaber meget rene og dermed godt vædbare overflader [9].

Hvis overfladen behandles på en måde, som ikke ændrer dens oxid eller morforlogi, bør langtidsegenskaberne søges dokumenteret, hvis der er krav om lang tids holdbarhed [10].

Inden mekanisk forbehandling bør der altid affedtes for at undgå indeslutning af forureninger i den mekanisk deformerede overflade [11]. Selv da kan opsamlede forureninger i slibemediet føre til forringede resultater, både når der slibes i hånden, og med roterende værktøjer. Som regel er reproducerbarheden med sådanne metoder ringe. Det samme gør sig gældende ved børstning med stålbørster[12].

Sandblæsning med siliciumoxid (kvartssand) kan måske være interessant til forbehandling af aluminium. I et otte års forsøg i marin kystatmosfære udviste samlinger i 6061-T6 limet med en tokomponent polyamidepoxy rumtemperaturhærdende lim god bestandighed, angiveligt fordi forbehandlingen efterlod en tynd silikatfilm på overfladerne, der virkede som korrosionsinhibitor mod angreb af chloridioner [13]. På grund af risikoen for silikose skal der træffes særlige forholdsregler, hvis der blæses med kvartssand.

Ved at fjerne det naturlige oxidlag med en kemisk metode opnås den fordel, at alle forureninger bundet til det naturlige oxidlag fjernes, og at der dannes et nyt og langt mere ensartet oxidlag, der oftest vil være bedre vædbart for limen, så der sikres god kontakt i grænsefladen mellem lim og oxid. Herved skabes forudsætninger for høj styrke og forbedret bestandighed under udendørs klimabelastning.

"Deoxidizers" bestående af butylalkohol og phosphorsyre kan benyttes til en sådan behandling. Efter dampaffedtning dyppes aluminiumemnerne i deoxidizeren i få minutter, hvorefter de skylles omhyggeligt i deioniseret vand og lufttørres [14].

I ASTM D-2651-79 beskrives seks metoder (A-F) til kemisk forbehandling af aluminium. Minford foreslår metode A, som indebærer brug af chromsvovlsyre, efterfulgt af chromsyreanodisering eller phosphorsyreanodisering, som den mest kompromisløse metode, når målet er stabile limsamlinger under høj mekanisk belastning i aggressivt miljø gennem lang tid [15]. Denne anbefaling er formentlig givet på baggrund af både ældningsforsøg og faktiske driftserfaringer. Andre kilder angiver chromsyreanodisering som den bedste [16], men her har prøvningsmetoden været måling af revnetilvækst ved kileprøvning i op til tre år.

I det hele taget er kemiske metoder baseret på syrer og chromat ("FPL etch", "optimized FPL etch") klassiske, når der skal fremstilles de mest stabile limsamlinger. Årsagen til disse metoders større effektivitet er angiveligt, at de danner aluminiumoxid med boehmitstruktur i stedet for den bayeritstruktur, som er resultatet af en naturlig oxidvækst. Bayerit er følsomt for vand, der omdanner det til aluminiumhydroxid, som er meget løst bundet til det underliggende aluminium. Boehmit er derimod mere modstandsdygtig mod nedbrydning forårsaget af vand [17].

Erfaringer har imidlertid vist, at til brug i marin eller kystnær atmosfære er end ikke FPL-ætsning tilstrækkelig til at sikre integriteten af limsamlinger i fly [18], og den i dag meget anerkendte phosphorsyreanodisering blev derfor udviklet.

Bestandigheden af sandblæste overflader er markant ringere end FPL-ætsede, dog med kvartssandblæste overflader som en undtagelse [19].

Det har vist sig, at tilstedeværelsen af aluminium- og kobberioner i passende koncentration i FPL-badet har en gunstig effekt ved at danne et oxid, som er bedre vædbart for limen. Koncentrationerne skal imidlertid holdes inden for visse grænser, idet for høje indhold har negativ virkning. Det er også vist, at chlorid- og flouridioner i badet kan give dårligere resultater [20].

I det hele taget er det kritisk for et optimalt resultat, at procestemperaturer, tider og koncentrationer styres [21]. Ikke publicerede eksperimenter antyder, at der også kan opnås udmærket bestandighed i samlinger af 6061-T6 efter en kold FPL-type behandling og limning med en- eller tokomponent epoxy [22].

Lige så gode resultater synes at kunne opnås ved ætsning i kold chlorbrinte-butylalkoholopløsning, men heller ikke disse eksperimenter er publiceret [23].

Brugen af kommercielle chromat-conversion coatings er rapporteret at give nogen bestandighed i marin kystatmosfære [24], men vædbarheden af sådanne coatings afhænger af den varmebehandling, de udsættes for ved tørringen.

Anodisering danner relativt tykke oxidlag, som kan give god korrosionsbeskyttelse af aluminiumoverfladen. Svovlsyreanodisering giver en glimrende beskyttelse på grund af et meget tykt oxidlag. Laget er imidlertid også sprødt, og det egner sig derfor mindre godt til limning, især hvis samlingerne udsættes for lave drifttemperaturer og afskrælningspåvirkning [25].

Til almindelig slid- eller korrosionsbeskyttelse afsluttes anodiseringen med en forsegling, der kan udføres ved at behandle emnet i kogende vand eller varm vanddamp. Herved hydratiseres oxidlaget og kvælder op, så porerne lukkes og derved gør overfladen mindre modtagelig for smuds.

Chromsyreanodisering giver en god korrosionsbeskyttelse og et tyndere oxidlag med gode mekaniske egenskaber. Overfladen af oxidlaget har en skælagtig struktur, som giver mulighed for mekanisk forankring af limmolekylerne, i modsætning til svovlsyreanodiseringens finporøse struktur. I Europa undgår man omhyggeligt ethvert procestrin, som kan forsegle overfladen, mens man i USA i større omfang benytter forsegling; det skal måske ses i sammenhæng med brugen af forskellige limformuleringer i Europa og USA [26].

Anvendelsen af chromsyreanodisering er normalt begrænset til legeringer med et totalt indhold af legeringselementer under 7.5%, og desuden et lavt indhold af magnesium og silicium [27].

Til krævende opgaver må chromsyreanodiseringen suppleres med en korrosionsinhiberende primer.

Anodisering i phosphorsyre danner et ganske tyndt oxidlag med en åben porestruktur, som er velegnet til at forankre lim- eller primermolekyler. Derimod yder det tynde lag kun ringe korrosionsbeskyttelse, og særlig beskyttelse af limfugens rand, som ikke er dækket med lim eller primer, er derfor nødvendig. Med en sådan udførelse giver phosphorsyreanodisering god bestandighed både i fugtig-varmt, vådt og saltvandsmiljø [28].

Hvad enten forbehandlingen består i affedtning, slibning, sandblæsning, ætsning eller anodisering, kan den afsluttes med påføring af en primer. Der skelnes mellem

beskyttelses/vedhæftningsforbedrende primere, og “coupling agents”, uden at afgrænsningen er helt klar. Funktionen af de første er dels at dække og beskytte den forbehandlede højenergioverflade, så den ikke bliver forurenet inden limningen, og dels at trænge helt ind i alle overfladens mikroskopiske sprækker, porer og hulrum, så der sker en effektiv vædning og mekanisk forankring af polymermolekylerne. Det giver en bedre forbindelse til den efterfølgende lim, der som regel er mere pastøs, og derfor kun vanskeligt kan væde overfladen lige så godt. Det forudsætter naturligvis, at limen kan væde primeroverfladen godt.

Formålet med coupling agents er ved påføringen at etablere kemiske bindinger til overfladens oxid, og ved den senere limning at binde sig kemisk til limen [29]. Virkningen heraf skal være, at lim bundet med kemiske bindinger vanskeligere kan fortrænges fra overfladen af stoffer, som binder sig til den med svagere intermolekylære bindinger, eksempelvis vand.

Et sådant kemisk bindeled mellem oxidet og limen kan etableres ved at påføre overfladen en opløsning af silaner, men typen af silan, opløsningens koncentration og pH samt tørretid og -temperatur er kritisk, ligesom aluminiumlegeringen også kan have indflydelse på effektiviteten [30].

Udover at give vedhæftningsforbedring og “konservering” af overfladen kan primeren virke korrosionshæmmende, for eksempel ved et indhold af chromater, som danner en beskyttende film.

For brugen af primere taler, at de forbedrer mulighederne for at opnå acceptable resultater med rumtemperaturhærdende lime, og at der i praksis er påvist forbedret bestandighed ved brug af primere. Imod brugen taler dels omkostningen ved et ekstra procestrin, brandrisiko og miljøbelastning fra typer med organisk opløsningsmiddel eller chromat, samt at primerlaget undertiden kan være samlingens mekanisk svageste led [31].

Ved limning af aluminium til andre materialer kan man komme ud for, at ingen lim er det optimale valg til begge overflader. Brug af en primer på den vanskeligst vædbare overflade kan her gøre det muligt at opnå tilstrækkelig vædning med en lim, som er velegnet til den anden overflade [32].

Limtyper

Sædvanemæssigt opdeler man limprodukter i “lime” og “fugemasser”, men grænsen er flydende. Lime er primært beregnet til at overføre last, mens fugemassers hovedfunktion er at tætne. Nogle fugemasser har imidlertid en meget god og stabil vedhæftning, og er velegnede til at overføre nogen last. På grund af deres elasticitet bliver spændingskoncentrationerne i fugen mindre end med de mere hårde lime, og ved små belastninger kan de være interessante til

lastbærende formål. I nærværende fremstilling er der derfor medtaget nogle produkttyper, som man normalt ville betegne som fugemasser.

Klassifikation af lime kan eksempelvis ske på basis af deres kemiske sammensætning, deres afbindingsmekanisme, eller deres fysiske tilstandsform. Den førstnævnte er sædvanemæssigt meget brugt, men den kompliceres i praksis af, at mange kommercielle produkter indeholder mere end én kemisk type.

Valget af limprodukt til en given opgave indebærer et kompromis mellem en lang række egenskaber og hensyn. Ud fra et driftssynspunkt vil man for eksempel fokusere på styrke ved forskydnings-, afskrælnings- og slagpåvirkning, mekaniske egenskaber ved høje og lave temperaturer, krybeegenskaber og modstandsdygtighed mod kemiske påvirkninger fra vand og andre stoffer.

Fra en produktionssynsvinkel kan evnen til at væde overfladen, påførings- og hærdningsbetingelser samt pris og arbejdsmiljø være relevante.

I det følgende fokuseres der på strukturel limning af aluminium til sig selv. Med "strukturelle limninger" menes i denne sammenhæng samlinger, som har en sådan grad af elasticitet og sejghed, at de i et rimeligt omfang tåler de belastningsarter, som er uhensigtsmæssige for limninger, nemlig afskrælning, kløvning og slagpåvirkning, og at de kan udføres med en acceptabel langtidsholdbarhed. Det betyder, at limtyper med i øvrigt gode forskydningsstyrker, eksempelvis cyanoacrylater, ikke er medtaget på grund af deres relative sprødhed.

Gennemgangen er ikke udtømmende, men der peges på udvalgte limtyper, som kan være interessante.

Det gælder generelt ved sammenlimning af to diffusionstætte materialer, at man ikke kan benytte lime, som afbinder ved fordampning af opløsningsmiddel. Når afbindingsmekanismen beror på diffusion af fugt ind i limfugen , kræver det en vurdering og afprøvning i hvert enkelt tilfælde. Hvor der der krav om en hurtig og fuldstændig gennemhærdning, vil det formentlig være mest hensigtsmæssigt at benytte tokomponentsystemer.

Generelt giver varmhærdning, også af lime beregnet til rumtemperaturhærdning, bedre styrker [33], og ofte, men ikke altid, bedre bestandighed [34]. Der kan være signifikante forskelle på egenskaberne af kommercielle produkter af samme type, og man kan således **ikke** overføre erfaringer med ét produkt til et andet [35].

Polysulfid-epoxy er en gruppe af fugemasser, der hærder ved stuetemperatur, binder godt til aluminium, og giver god bestandighed uden komplicerede forbehandlinger. Polysulfider baseret på thioethere er en speciel gruppe af fugemasser, som angiveligt har bedre modstandsdygtighed mod angreb fra vand og kemikalier [36].

Siliconegummilim er kun egnet til at overføre små belastninger. De findes som enkomponent rumtemperatur fugthærdende (RTV) lim, og som tokomponentsystemer. De enkomponente typer udmærker sig ved at binde godt til aluminiumoverflader efter en minimal forbehandling, men gennemhærdning af store arealer tager lang tid, når fugten kun kan komme ind langs limfugens rand. Bestandigheden mod vand kan være god, mens det samme ikke behøver at være tilfældet i fugtig-varmt klima [37]. Blandt fugemasserne synes typer på siliconegummibasis i dag at have de bedste egenskaber til de fleste formål, men bestandigheden på aluminiumoverflader varierer fra ringe til fremragende, afhængigt af det konkrete produkt. Nyere RTV-fugemasser er med godt resultat blevet anvendt som beskyttelse af limefugeranden mod pitting korrosion i marin kystatmosfære i op til otte år [38].

Hæftelim er ikke-hærdende højviskose produkter, der primært benyttes til ikke-permanente samlinger, samlinger med ganske lave belastninger, eller kortvarige belastninger i forskellige retninger. 3M har dog udviklet et produkt, som forener fordelen ved hæftelimens øjeblikkelige fiksering med hærdelimens styrke og permanens [39]. Langtidsegenskaberne for samlinger udført hermed foreligger ikke oplyst.

Modificerede acryllime ("SGA", "HP") hærder ved rumtemperatur, er tolerante for olieforurening af overfladen, og giver samlinger med god styrke og sejghed. Specielt på ætsede overflader kan bestandigheden være god, men også på blot affedtede overflader kan der opnås bestandigheder, som kan være interessante [40].

Vinyl-phenollim var den første type lim, som med godt resultat blev benyttet til limning af aluminium i fly. Typen anvendes stadig til dette formål, især som limfilm, og der opnås høje styrker og god bestandighed [41].

Nitril-phenollim består af nitrilgummi og phenol-novolacharpiks. På chromsvovlsyreætset 6061-T6 er der vist fremragende bestandighed igennem to år i et miljø med varmt vand og kondenserende fugtighed, og tilsvarende i otte år i udendørs atmosfære [42]. Holdbarheden overgås næppe af nogen anden lim, men hærdningen skal ske ved høj temperatur (177°C) og tryk, og både i henseende til styrke og servicetemperatur overgås limen i dag af nogle epoxylime, som oven i købet stiller mindre krav til hærdebetingelserne [43].

Epoxylim er en fællesbetegnelse for en række produkter med meget forskellige egenskaber. De findes som tokomponenttyper, som kan afbindes ved rumtemperatur, og som enkomponente produkter, hvor harpiks og hærder er færdigblandet fra producenten. I dette tilfælde sættes afbindingsprocessen i gang ved opvarmning. Tidligere epoxyprodukter kunne være ganske sprøde og dermed meget følsomme for afskrælningspåvirkning og slag, men nyere formuleringer har stærkt forbedrede egenskaber [44].

Det er fundet, at der kan opnås tilforladelig bestandighed ved eksponering i vandige miljøer, især når aluminiumoverfladen er forbehandlet ved ætsning [45]. Bestandigheden bliver imidlertid ringe, hvis samlingerne udsættes for saltvand; selv med FPL-ætsede overflader holder samlingerne kun til få ugers direkte eksponering for saltvand på grund af hurtigt fremskridende

pitting korrosion fra fugeranden og indefter. Bestadigheden af samlinger limet med tokomponent epoxylim kan stadig blive nogenlunde acceptabel, hvis der er foretaget en anodisering. Chromat conversion coating kan også anvendes, men giver et noget ringere resultat. Hvor sådanne behandlinger er uøkonomiske, kan man eventuelt opnå nogen forbedring i forhold til tokomponentlim ved at bruge enkomponent varmhærdende epoxylim [46].

Anaerobe lime kan give samlinger med høj forskydningsstyrke, og med produkter formuleret til strukturelle formål opnås der forbedret sejghed, men værdierne er dog langt fra så gode som for gummimodificerede epoxylime [47]. Der foreligger kun få undersøgelser af bestandighedsforholdene, som imidlertid viser en forbedring gennem 1970erne [48].

Polyurethanlime kan formuleres med et bredt spektrum af fysiske egenskaber, herunder gode elastiske egenskaber ved lave temperaturer. De findes som termoplastiske og termohærdende lime, hvor de sidstnævnte forventeligt har bedre egenskaber ved kemisk eller termisk påvirkning. Limene har glimrende modstandsdygtighed mod vand, uden at det dog giver nogen garanti for limsamlingernes integritet i vådt eller fugtig-varmt miljø, fordi limenes evne til at væde forskellige overflader kan variere. Hvis vædningen har været utilstrækkelig, kan vand forårsage delaminering, selv om limen i sig selv er relativt upåvirket [49].

Brugen af primere kan øge vædbarheden og dermed bestandigheden, men valget af den rigtige primer er helt afgørende for effekten. På baggrund af nogle observationer af hurtige og betydelige styrketab i vådt miljø rejses der tvivl om polyurethanlimenes evne til at konkurrere med en række epoxylime under sådanne forhold, men der rapporteres på den anden side også om tilfælde af samlinger med udmærket fugtbestandighed [50].

På grund af de gode muligheder for at formulere polyurethanlime, så både produktionstekniske og driftsmæssige hensyn tilgodeses, må det være interessant at undersøge, om acceptable bestandigheder kan opnås ved brug af passende primere og/eller ved formulering af specielle produkter til specifikke anvendelser.

Polyurethanfugemasser har gode egenskaber i form af glimrende vedhæftning og forventet god langtidsholdbarhed. Mens tidligere typer havde tvivlsom bestandighed, har nogle nyere formuleringer fra 1970erne udvist acceptabel til usædvanlig god bestandighed i op til ti års udendørs eksponering [51]. Et minus er dog en øvre driftstemperatur omkring 80°C.

Referencer:

1 Minford, J. D.: Handbook of Aluminum Bonding Technology and Data, Marcel Dekker, New York 1993.
2 Ibid., p. 385.
3 Ibid., p. 386, 387.
4 Ibid., p. 157.
5 Ibid., p. 70.
6 Ibid., p. 71.
7 Ibid., p. 73.
8 Ibid., p. 74.
9 Ibid., p. 74.
10 Ibid., p. 76.
11 Ibid., p. 78.
12 Ibid., p. 79.
13 Ibid., p. 80.
14 Ibid., p. 81.
15 Ibid., p. 81.
16 Armstrong, K. B.: Long-term durabiliy in water of aluminium alloy adhesive joints bonded with epoxi adhesives, Int. J. Adhesion and adhesives, vol. 17, pp. 89-105.
17 Minford, J. D.: Handbook of Aluminum Bonding Technology and Data, Marcel Dekker, New York 1993, p. 84.
18 Ibid., p. 84.
19 Ibid., p. 85.
20 Ibid., p. 87.
21 Ibid., p. 88.
22 Ibid., p. 89.
23 Ibid., p. 91.
24 Ibid., p. 62.
25 Ibid., p. 94.
26 Ibid., p. 96.
27 Ibid., p. 96.
28 Ibid., p. 98.
29 Ibid., p. 99.
30 Ibid., p. 104, 107.
31 Ibid., p. 102, 103.
32 Ibid., p. 104.
33 Ibid., p. 105.
34 Ibid., p. 377, 378.
35 Ibid., p. 152, 157, 188.
36 Ibid., p. 189.
37 Ibid., p. 132.
38 Ibid., p. 193.

39 Bennet, G. et al.: Structural bonding tape: an innovation in adhesive bonding, Adhesive Age, September 1996, pp. 19-23.
40 Minford, J. D.: Handbook of Aluminum Bonding Technology and Data, Marcel Dekker, New York 1993, p. 143.
41 Ibid., p. 146.
42 Ibid., p. 146.
43 Ibid., p. 147.
44 Ibid., p. 150.
45 Ibid., p. 157.
46 Ibid., p. 157.
47 Ibid., p. 150, 176.
48 Ibid., p. 175.
49 Ibid., p. 177.
50 Ibid., p. 179.
51 Ibid., p. 193.