

Dokument: SASAK-RAP-KV-AKS-BIL-0006-03

Kvalitetsstyring og Kontrol for Limning

SASAK
Projekt 4 - Limning

Bo Rohde Jensen
R&D Manager, Barsmark A/S

HMK *Bilcon A/S*, maj 2001

1 Kvalitetsstyring og Kontrol for Limning

1.1 Indledning

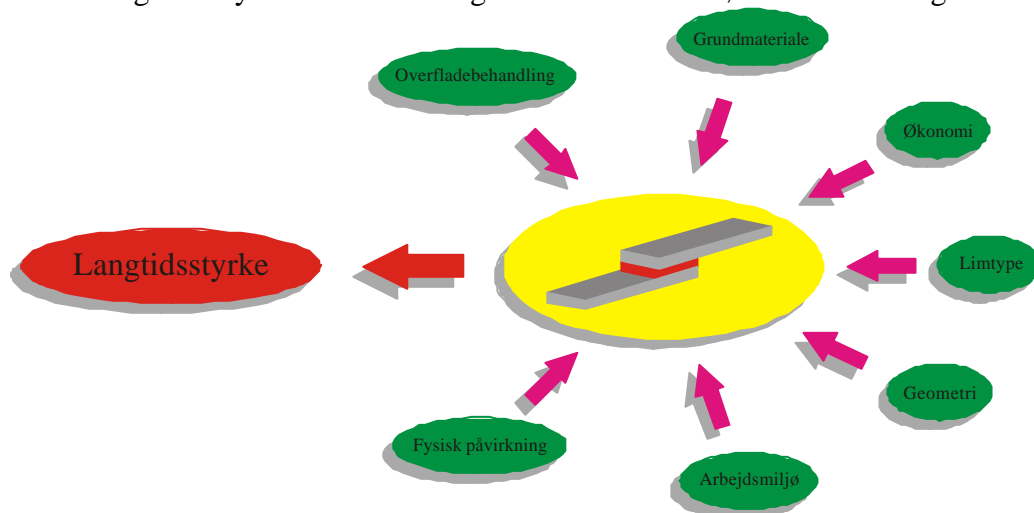
Følgende dokument er en kort redegørelse for kvalitetsstyring samt kontrol i forbindelse med limteknologien.

Når vi taler om et produkt, kan dets kvalitet være enten ”god” eller ”dårlig.” Det samme produkt kan af forskellige personer opfattes som værende af god eller dårlig kvalitet, da der i vurderingen af produktet lægges vægt på forskellige ting. For at kunne bedømme et produkts kvalitet, må man derfor se på, hvilke kriterier man vil bedømme det ud fra. I produktions øjemed opstilles typisk nogle objektive egenskaber som produktet skal kunne opfylde. Alt sammen størrelser der kan måles, og køberen kan kontrollere. Limteknologien medfører imidlertid en række vanskeligheder med udførelse af fyldestgørende kontrol. Det er generelt anerkendt at høj kvalitet ikke nødvendigvis er resultatet af omfattende kontrol, hvorfor dette formål ikke umiddelbart tilskrives videre betydning i denne sammenhæng. Kvalitetsstyring i forbindelse med limning er et spørgsmål om udarbejdelse af enkle og gode procedurer for de enkelte arbejdsprocesser. Et godt og veldefineret konstruktionsgrundlag, afstemt efter produktionsapparatet, være en af forudsætningerne for god produktionskvalitet samt produktivitet.

1.2 Design

En limsamling består af kombinationen af materialer med forskellige egenskaber samt en overlapzone gennem hvilken limsamlingen potentielt kan opnå evnen til at overføre store belastninger.

Kombinationen af overlap samt forskellige materialeegenskaber giver anledning til en kompliceret belastningstilstand i limfugen af både bøjnings- og forskydningsspænding. For at designe en limfuge korrekt skal der tages hensyn til alle limsamlingens delelementer i større eller mindre grad.



Figur 1 Illustration af elementer som influerer på en limsamling.

Holdbarheden af en limsamling er som oftest kilde til størst bekymring. Der kan sjældent gives et håndfast svar på levetiden, da den er afhængig af uoverskueligt mange faktorer. Der er foretaget en

lang række test af talrige overfladebehandlingsmetoder og limtyper udsat for en række forskellige typer kraft- og miljøbelastninger. I praksis er langtidsegenskaber et spørgsmål om korrekt valg af forbehandling med omhyggelig renhed i alle produktionsled.

For at opnå en god limsamling skal følgende som minimum tages i betragtning:

- Vælg en korrosionsbestandig overfladebehandling.
- Vælg limtype med bestandighed overfor de tilstedeværende kemikalier samt vind & vejr.
- Vælg en limtype med så lavt E-modul som muligt indenfor de rammer som den overordnede stivhed tillader.
- Design limfugen så kærsvirkninger minimeres.
- Placer/udform limfuge så den primært belastes i forskydning.
- Placer limsamlingen så den ikke samler vand.

Placer limsamlingen så den evt. efterfølgende kan repareres.

1.3 Normer og standarder

Følgende er en liste over en række standarder og normer som er interessante for limning.

Tabel 1 Eksempler på standarder for limning.

Betegnelse	Beskrivelse
DS/EN 1066	Klæbestoffer prøveudtagning
ISO 4578	Adhesives – Determination of peel resistance of high - strength adhesive bonds – Floating-roller method.
ISO 4588	Adhesives – Preparation of metal surfaces for adhesive bonding
ISO 9142	Adhesives – Guide to the selection of standard laboratory ageing conditions for testing bonded joints.
EN/ISO 9653	Adhesives – Test method for shear impact strength of adhesive bonds.
Eurocode 9	Design of aluminium structures – Part 2: Structures susceptible to fatigue. (afsnit 4.4.3, 5.2.3 og 5.3.4)
DIN 53281- 53289	Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen.
VDI 2299	VDI-Richtlinien – Metallkleben
MMM-A-132	Adhesives, Heat resistant, Airframe structural, Metal-to-metal
MIL-A-9067 C	Adhesive bonding metal, Process and inspection requirements.
DTD 755 B*	Aircraft material specification, Adhesive suitable for joining metals

DTD 915 A*	Aircraft material specification, Process for cleaning aluminium aluminium-alloy plating.
ASTM D896-66	Resistance of adhesive bonds to chemical reagents.
ASTM D903-49	Peel or stripping strength of adhesive bonds.
ASTM D950-54	Impact strength of adhesive bonds.
ASTM D1002-64	Strength properties of adhesives in shear by tension loading.
ASTM D1062-51	Cleavage strength of metal-to-metal adhesive bonds.
ASTM D1183-61T	Resistance of adhesives to cyclic laboratory aging conditions.
ASTM D1780-62	Conduction creep tests of metal-to-metal adhesives
ASTM D1781-62	Climbing drum peel test for adhesives.
ASTM D1828-61T	Atmospheric exposure of adhesive-bonded joints and structures
ASTM D1876-61T	Peel resistance of adhesives. (T-peel test)
ASTM D1879-61T	Exposure of adhesive specimens to high-energy radiation.
ASTM D2182-63T	Strength properties of metal-to-metal adhesives by compression loading. (disk shear)
ASTM D2293-64T	Creep properties of adhesives in shear by compression loading. (metal to metal)
ASTM D2294-64T	Creep properties of adhesives in shear by tension loading. (metal to metal)
ASTM D2295-64T	Strength properties of adhesives in shear by tension loading at elevated temperatures. (metal to metal)
ASTM D2557-66T	Strength properties of adhesives in shear by tension loading in the temperature range of $-267,8$ to -55°C .

1.4 Produktion

Kvaliteten af en limsamling ligger primært i udførelsen, hvorfor det er af fundamental betydning at have styr på produktionsprocessen. I det følgende gennemgås limteknologiens typiske produktionsfaciliteter samt krav til samme.

Til industriel limning består det samlede produktionsanlæg af doseringsanlæg, afrensningsværktøj & evt. kemikalier, forbehandlingsværktøj & evt. kemikalier, fiksturer, evt. accelererede hærdefaciliteter samt personlige værnemidler.

1.4.1 Produktionsfaciliteter

Området hvor limningen udføres skal som udgangspunkt overholde de gældende arbejdsmiljømæssige regler. Herved opnås både personlig sikkerhed for operatørerne, men også limsamlingen i sig selv. Ved isolation af området, hvor der arbejdes med limning, minimeres risikoen for støvforurening fra resten af fabriksområdet. Desuden opnås fordelagtige muligheder for klimastyring i lokalet. Af særlig betydning er styring af temperaturen, da den har direkte indflydelse på åbentiden samt hærdetid for de fleste limtyper.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Fysisk adskillelse af limproces og øvrige arbejdsprocesser.
- Minimering af støv og lign. i luften i og omkring produktionsfaciliteterne.
- Temperaturstyring er særlig vigtigt hvis limtyper med kort åbentid anvendes.

1.4.2 Doseringsanlæg samt påføring af lim

De fleste limtyper opnår deres egenskaber på baggrund af kemiske reaktioner mellem forskellige komponenter i limen. Blandingsforholdet er afgørende for at limen opnår de ønskede egenskaber, hvilket i praksis bedst ved automatiserede blandingsanlæg eller 1. komponent limtyper. Der opnås herved også en række fordele i form af mindre risiko for forurening af limen, hvis den kommer direkte fra originalemballagen gennem et automatiseret blandings og doseringsanlæg. Denne forurening behøver ikke nødvendigvis være i form af fremmedlegemer, men kan også være luftbobler introduceret under f.eks. manuel omrøring.

Ved påføring af lim skal kunne udlægges en jævn og ensartet limfuge i henhold til det specificerede under dimensionering af konstruktionen/limsamlingen. Limen skal påføres i et mønster der sikrer at der ikke indesluttet luft i limfugen ved sammenpresningen af emnerne, hvis der er tale om større fugebredde. Hvis det er muligt, bør anvendes indsprøjtning af limen, da det giver maksimal sikkerhed for at risikoen af luftindeslutninger minimeres.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Anvend automatiserede doseringsanlæg eller alternativt 1 komp. systemer.

1.4.3 Forbehandling

Forbehandling af overfladerne har til formål at sikre at overfladebeskaffenhed er som specificeret i designfasen. I praksis kan dette opdeles i en effektiv rengøring, som aldrig kan udelades, med mindre der gøres specielle tiltag, og en overfladebearbejdning (kemisk, elektrokemisk, mekanisk mm.), som har til formål at sikre et stabilt og korrekt grundlag for limen at binde på. Betragtes limning mere generelt, kan forbehandling også udføres med henblik på ændringen af overfladespændingen. Det er mindst ligeså vigtigt at sikre, at overfladerne ikke forurenes efter forbehandling som det er at udføre forbehandlingen korrekt. Anvendes f.eks. primere til forbedring af

korrosionsmodstandsevnen, skal samlingen udføres indenfor primerens specificeret aktive periode. Dette betyder at emnerne normalt ikke kan primes og derefter lagerføres med henblik på senere brug.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Afrens og slib overfladerne som minimum.
- Rens emnerne i sidste øjeblik og hold dem i øvrigt altid (også før afrensning!) adskilt fra potentielle forureningskilder.

1.4.4 Fiksering

Det er vigtigt for en limsamling at opnå den specificerede geometri i samlingen, hvorfor fiksering af emnerne under udhærdning er vigtig. Herunder bør understreges at emnerne aldrig skal presses helt sammen, da der skal være en velkontrolleret fugetykkelse i henhold til det specificerede. Som oftest er det mest kritisk hvis fugetykkelse bliver for lille da spændingsniveauet herved i samlingen kan blive kritisk stort.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Overhold specificerede fugetykkelse.
- Lav fiksturer til sikring af optimale forhold under udhærdning.

1.4.5 Udhærdning af limen

En lim opnår gradvist sin fulde styrke under en hærdeproces, hvor limens kemiske grundelementer reagerer. Her er tale om en ikke-reversibel proces, hvorfor det er vigtigt at limen påføres inden åbentiden (dvs. i det tidsrum hvor limen er i stand til kemisk at binde på en overflade) er overskredet. Limen har ingen reel styrke før der er opnået en delvis hærdning, som først indtræffer længe efter åbentiden er overskredet. I praksis betyder dette ofte at hærdeprocessen skal accelereres, hvilket som regel kan gøres vha. opvarmning. Alternativt kan etableres mere permanente fiksturer, som kan følge emnet videre i produktionen.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Overhold åbentid for limen.
- Tilfør om muligt varme under udhærdning.

1.4.6 Adkomstforhold

For limning gælder ofte at adgangsforholdene ikke er så kritiske som ved f.eks. svejsning da der ikke behøver at være fysisk adgang til limfugen i samlet tilstand. Limen kan påføres i adskilt tilstand og med henblik på efterfølgende at fordele sig selv under sammenpresning. Det gælder dog altid at emnerne skal kunne samles direkte ved sammenpresning således at emnerne ikke forskydes i limfugens eget plan efter kontakt er opnået mellem lim og emnerne.

1.5 Produktionsmæssige konsekvenser

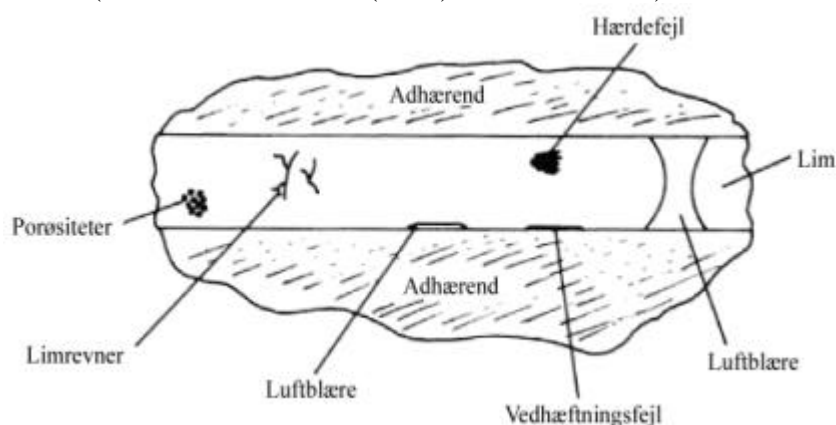
For at sikre kvaliteten bør der være særskilte produktionsfaciliteter med klimastyring. Det er særlig vigtigt hvis der er risiko for støv i luften samt store temperatur/fugtighed udsving.

1.6 Inspektion

Styrken af en limsamling er resultatet af en lang række komplicerede forhold, som ikke alle let lader sig inspicere i praksis. Ideelt set kan disse forhold opdeles i 2 overordede grupper efter hvilken indflydelse de har på styrken af en limsamlingen: den kohæsive styrke af selve polymeren eller den adhæsive styrke imellem emnet og polymeren. Herudover findes også altid i praksis en række fysiske fejl i form af f.eks. inklusioner, luftblærer, hærdefejl mm.

Den adhæsive styrke lader sig ikke let inspicere da den er et interface fænomen, som kun har ringe udstrækning. I interfacelaget optræder bl.a. de stærke kemiske bindingskræfter, som binder emne og limen sammen. Imidlertid kan selv med moderne metoder ikke entydigt afgøres hvilken grad af adhæsion der er opnået. Derfor er dette aspekt af kvalitetskontrol som oftest begrænset til inspektion af overfladerne forud for limning.

Den kohæsive styrke er i praksis den letteste at bestemme, hvorfor den er en essentiel del af de fleste testprogrammer (både ikke destruktive (NDT) samt destruktive).



Figur 2 Illustration af fejltypen i en limsamling (kilde Adams et al).

1.6.1 Fejltypen

Porøsiteter skyldes urenheder samt opslæmmed luft i limen. De forefindes stort set i alle limsamlinger i et eller andet omfang. **Revner** opstår ved problemer med hærkning (hærdesvind og/eller termiske residual spændinger), for store spændinger eller som følge af udmattelsesbelastning. **Hærdefejl** kan opstå lokalt som følge af utilstrækkelig omrøring/blanding af limen inden påføring. Større områder opstår typisk på grund af brug af forkert blandingsforhold for limen eller ved utilstrækkelig opvarmning under udhærdning (særlig farlig ved 1. komponentformuleringer med høj aktiveringstemperatur). I de tilfælde hvor limen er utilstrækkeligt udhærdet, men kan opnår tilstrækkelig tid til at hærde alligevel ved lavere temperatur, kan tales om at fejlen udbedrer sig selv.

Dette gør sig imidlertid kun gældende for 1 & 2 komponentsystemer uden en specifik aktiveringstemperatur. **Luftblærer** skyldes indespærret luft i limfugen, som ikke kunne undslippe under sammenpresningen af emnerne eller ved utilstrækkelig mængde af lim. Ved påføringen af lim på det ene emne i et ufordelagtig mønster kan opstå en række mindre kaviteter lokaliseret ved det andet emne. **Vedhæftningsfejl** opstå ved delvis eller manglende vedhæftning i mellem lim og emner på trods af der er opstået fysisk kontakt. Denne type fejl hænger normalt sammen med utilstrækkelig eller forkert overfladebehandling eller rengøring.

1.6.2 Testmuligheder forud for samling

Disse er hovedsageligt baseret på overfladeinspektion ud fra ønsket om særlige overfladeegenskaber. Der er gode muligheder for at kontrollere overfladeruhed (i visse situationer kan overfladeruheden have betydelig indflydelse på styrken) samt overfladebehandlingen. Det er altid emne for diskussion, hvorvidt rengøringen har været tilstrækkelig. En simpel test baseret på befugtningens graden kan udføres vha. vand eller de mere effektive Dynes penne (Adams & Drinkwater). Er der ikke udført tilstrækkeligt rengøring, spredes væsken ikke fra hverken pennene eller vandet. Det fordelagtige ved Dynes penne er at overfladebehandlingen også kan kontrolleres hvis den har haft til formål at f.eks. hæve overfladespændingen over en minimumsgrænse (af særlig interesse for plastlimning). Flyindustrien har udviklet en række mere avanceret værktøj som f.eks. Fokkers Contamination Tester (PABST). Denne metode er baseret på analyse af selve overfladen (electron emission energy), som afhænger stærkt af elementerne som er til stede på overfladen.

1.7 Kontrolmetoder

1.7.1 NDT

Der er udviklet en lang række forskellige metoder til ikke destruktiv testning af bl.a. limsamlinger. Fælles for dem alle er, at de i praksis er bedst til at lokalisere uregelmæssigheder i form af revner, fremmedlegemer, kaviteter og kan derfor ikke give et nuanceret billede af en limsamling styrke. Med de nuværende metode ikke opnås entydig relation mellem målesignal og vedhæftningsgraden (Jens Rusborg, Force Inst. Aalborg). Metodernes styrke ligger indenfor testning af hvorvidt limfugen af den ønskede udfyldningsgrad samt overvågning af revnevækst in-situ. Sidst nævnte er særdeles vigtigt for krævende limsamling i f.eks. aero-space applikationer.

Tabel 2 Forskellige metoder samt deres anvendelighed overfor forskellige fejltyper [Munns & Georgiou]:

Description	Disbonds	Voids, porosities	Poor cohesion	Poor adhesion
Normal Incidence Comp. Waves	√	√		I
Spectroscopy	√	√	[√]	R

UOIT ¹	√	√	[√]	R
Interfacial waves	√	√	[√]	R
Bondtesters	√	√	[√]	I
Acousto-ultrasonics	[√]			R
Low-frequency vibration	√			I
Holography	√			I/R
Radiography	(√)	(√)		I
Thermography	√	(√)		I/R
NMRI ²	(√)	(√)	[√]	I/R
Dielectric measurements	(√)	(√)	[√]	R

1 - Ultrasonic Oblique Incidence Technique √ Detectable (although, there may be limits to the size of the defect capable of being detected)

2 - Nuclear Magnetic Resonance Imaging

I - Industrial Technique (√) Technique currently being developed and showing some progress

R - Research tool

I/R - Specialist tool in industry and currently being researched [√] Application limited

Den mest udbredte metode til inspektion af limsamlinger er ultralyd. Metoden er potentielt mere fleksibel end andre metoder, da den samtidigt med fejllokation kan anvendes til bestemmelse af materialeegenskaber in-situ.

1.7.2 Destruktiv testning

Ved mekanisk prøvning af limsamlingen kan opnås et entydigt billede af den umiddelbare styrke. Imidlertid er metoden mest anvendelig på et prototype-stadiet eller for større serier af mindre emner, hvor det er muligt at udtage prøveemner. Alternativt kan udarbejdes parallelemner i form af standardiserede prøveemner (f.eks. ASTM 1002-72 (shear lap), ISO 4578 (roller peel test), ISO 9142 (ældning)) som gennemgår de samme produktionstrin som de rigtige emner. Dette er en særdeles effektiv metode som anvendes i en række virksomheder (f.eks. hos Vestas Wind System A/S i forbindelse med limning af navflangen på vingene).

1.8 Acceptkriterier (fejl, tolerancer) vs. reparation

For limning er det ikke realistisk (under normale omstændigheder) at udføre NDT, da det både er dyrt og ofte ikke helt pålideligt. Reparation er mere besværlig i forbindelse med limning end f.eks. ved svejsning, da overfladebehandlingen forud for limning i nogle tilfælde ikke kan genskabes (f.eks.

anodiserede overflader). Kan der enten vha. visuel inspektion, NDT eller parallelemner konstateres uregelmæssigheder i produktionen skal den forhåndenværende sag ofte behandles individuelt. Der er mange trin undervejs i en limsamling som kan give anledning til fejl, men ikke alle er lige kritiske. F.eks. er en lim med et lettere forkert blandingsforhold sjældent så kritisk som en fejlbehæftet overfladeafrensning.

Følgende bør som udgangspunkt tages i betragtning:

- Medtag reparation vs. kassation i forbindelse med designfasen.
- Ved konstatering af fejl vurder, om det er muligt at genskabe den samme kvalitet samt styrke.

1.9 Reparation af limsamlinger

Reparation af en limsamling er ikke let. Under reparation skal sikres, at der opnås en kvalitet tilsvarende til resten af limsamlingen. Det er vigtigt at vurdere, om det er rationelt at udføre reparation eller om emnet blot skal kasseres ved konstatering af fejl. Det er som regel overfladebehandling, udhærdning vha. varme samt evt. geometrien, der kan være svær at genskabe.

1.10 Økonomiske konsekvenser

Limteknologien savner fortsat rationelle samt økonomiske overkommelige kontrolmetoder, hvorfor teknologien ofte er dyr hvis man ønsker et kvalitetsstyringssystem der er sammenlignelig med svejsning. Limning er derfor, som tidligere nævnt, et godt eksempel på at kontrol ikke er det rigtige værktøj til at fremme god kvalitet i en limsamling. For limning handler det om udfærdigelse af gode konstruktioner, procedure samt uddannelse af håndværkerne. Resultatet af manglende tillid til limning medfører som regel en væsentlig grad af overdimensionering, i hvilket er fordyrende for processen.

1.11 Uddannelse

Limning, eller det at udføre en limsamling, er et håndværk som så mange andre. Imidlertid opfattes det ikke sådan i praksis, da mange ofte selv har prøvet med større eller mindre grad af succes at lime ting sammen privat. Vi skelner imidlertid her imellem privat aktiviteter og industriel limning (el. strukturel limning). For at kunne udføre limning industrielt er god uddannelse en nødvendighed. Haves ikke den rette forståelse for limteknologiens elementer hos operatører samt designere, kan ikke opnås en tilstrækkelig ensartethed af produktet til at kvalitetsbegrebet giver mening. Der findes i princippet to grupperinger af uddannelser i forbindelse med limning, de lovpligtige (f.eks. Epoxy & Isocyanat bekendtgørelsen) og resten. De lovpligtige har i praksis intet med limning at gøre, men fokuserer i stedet på håndteringen af farlige kemikalier (f.eks. maling o. lign.). Grunduddannelse i håndteringen samt udførelse af limsamlinger på operatørniveau savnes derfor i Danmark. De fleste af de højere læreranstalter (Ingeniør højskoler samt Universiteter) besidder i dag uddannelseskompetence indenfor limning på et niveau svarende til det de fleste alm. danske

virksomheder kan få brug for. Dybere forståelse for limsamlingers mekanik samt forbehandling er områder for forbeholdt specialister.

Der er gjort en række tiltag for at opstarte faguddannelse på Tekniske skoler i Danmark for håndværkere med henblik på etablering af en limoperatør uddannelse. Særligt i regionen omkring Hydro Aluminium A/S i Tønder har der været fokus på dette med Tønder Tekniske skole i centrum.

Egentlige specialiserede uddannelser indenfor limning findes endnu ikke i Danmark, men på globalt plan er en mindre række tilbud iblandt hvilke følgende kan nævnes:

- Adhesion Short Science Course. Virginia Tech (CASS), USA.
- European Adhesive Specialist.
- European Adhesive Bonder.
- European Adhesive Engineer.

Referencer:

1. European Federation for Welding, Joining and Cutting (EWF) (1998), *Doc. EWF 515-01 European Adhesive Bonder – Minimum requirements for Education, Examination and Qualification.*
2. European Federation for Welding, Joining and Cutting (EWF) (1998), *Doc. EWF 516-01 European Adhesive Specialist – Minimum requirements for Education, Examination and Qualification.*
3. European Federation for Welding, Joining and Cutting (EWF) (1998), *Doc. EWF 517-01 European Adhesive Engineer – Minimum requirements for Education, Examination and Qualification.*
4. DS/EN ISO 9001.
5. Munns, I. J. & Georgiou, G. A. (1995), *Non-destructive testing for adhesively bonded joint inspection – a review*, INSIGHT Vol. 37 no. 12.
6. Adams, R. D. & Drinkwater, B. W. (1997), *Nonddestructive testing of adhesively-bonded joints*, NDT & E International, Vol 30, No. 2, Elsevier Science Ltd.
7. R.D. Adams, J. Comyn & W.C. Wake (1997), *Structural Adhesive Joints in Engineering*, 2. Ed, Chapman & Hall.
8. PABST (1979), AFFDL-TR-79-3129, *Design Handbook for Adhesive Bonding*, McDonald Douglas Corp.
9. PABST (1979), AFFDL-TR-79-3154, *Tooling, Fabrication and QA Reports*, McDonald Douglas Corp.
10. G. Habenicht (1986), *Kleben - Grundlagen, Technologie, Anwendungen*, Springer-Verlag

Øvrigt litteratur:

11. Sørensen, C. L. (1979), *Kvalitetsstyring af limsamlinger i apparatproducerende virksomheder*, Svejsecentralen, rapport nr. 79.37.
12. Sika GmbH (1998), *Elastic Bonding*, Verlag Moderne Industrie
13. Casco Nobel AB (1992), *Limhåndbogen*
14. Minford, J. D. (1993), *Handbook of Aluminium Bonding Technology and Data*, Marcel Dekker Inc.