Bei der Verwendung von Tränklacken bei lackisolierten Drähten darf der Tränklack den Drahtlack nicht angreifen, ebenso muß der ausgehärtete Tränklack sich mit den ihn im Betrieb umgebenden Materialien, z. B. heißes Trafoöl, vertragen.

Die Anwendungen von Tränklacken und Gießharzen (z. B. Beschichten, Umhüllen, Einbetten, Vergießen von Bauteilen oder Baugruppen) überschneiden sich sehr häufig, so daß eine klare Trennung nicht möglich ist.

Lackarten und Verwendung

Der Körperanteil (einschließlich Farbzusätze, Pigmentierung) bei Tränklacken liegt zwischen 40 und 70 %. Je nach Bauteil wird im Tauchverfahren oder im Vakuum getränkt. Vor dem Tränken muß das Werkstück vorgetrocknet und gereinigt werden. Die Trocknung der Tränklacke, bzw. die Aushärtung, erfolgt zwischen 90 und 140 °C und dauert je nach Lack, Körpergehalt und Temperatur zwischen 3 und 12 Stunden.

a) Öllacke

Trocknende Öle mischt man mit Harzen. Bei den sog. schwarzen Tränklacken wird Öl mit Asphalten oder Bitumen gemischt.

Öllacke sind elastisch und beständig gegen Säuren, Laugen, Feuchtigkeit und Trafoöl. Die zulässige Dauertemperatur beträgt etwa 120 °C.

Die Lacke werden häufig in Öltransformatoren verwendet. Schwarze Tränklacke dienen meist für Reparaturzwecke.

Ölpapier bzw. Ölleinen stellt man durch Tränken von säurefreiem Zellulosepapier bzw. Leinen mit Öltränklack her.

b) Öl- bzw. lösungsmittelhaltige, härtbare Kunstharzlacke

Als Tränklacke kommen hauptsächlich Phenolharz-Lacke zur Anwendung.

Die Lacke haben eine gute chemische Beständigkeit. Je nach der Zusammensetzung kann man hochelastische oder extrem hart verbackende Lacke herstellen. Die zulässige Dauertemperatur beträgt etwa 130 °C.

Phenolharz-Lacke werden im gesamten Bereich der Elektrotechnik verwendet, jedoch in wesentlich geringerem Umfang als lösungsmittelfreie Kunstharzlacke.

c) Lösungsmittelfreie, härtbare Kunstharzlacke

Als Tränklacke kommen meist Lacke auf Polyester-, Polyurethan- oder Epoxidharzbasis zur Anwendung. Teilweise werden auch Lacke auf Phenol- und Harnstoffbasis verwendet.

Die Lacke sind chemisch gut beständig und werden vor allem bei hochtourigen und thermisch hoch beanspruchten Maschinen eingesetzt. Die zulässige Dauertemperatur liegt zwischen 130 und 155 °C.

Die Eigenschaften der einzelnen Harze können den Beschreibungen in den vorhergehenden Abschnitten entnommen werden.

d) Silikonlacke

Silikonlacke erfordern lange Trocknungszeiten und hohe Trocknungstemperaturen (mehrere Stunden bei etwa 200 °C).

Sie sind teurer als alle anderen Tränklacke. Eigenschaften und Verwendung, vergleichen Sie Abschnitt 7.21 Silikonharz, -lack.

7.22.3 Überzugslacke

Überzugslacke dienen bei fertigen Bauteilen als Oberflächenschutz gegen mechanische und chemische Einflüsse sowie gegen Feuchtigkeit, Schimmelpilze und Insektenfraß.[1]

Sie sollen spritz-, tauch- oder streichfähig sein und möglichst bei Raumtemperatur schnell trocknen. Die Lacke sind meist öl-, lösungsmittel- oder wasserhaltig und werden meist in 2...3 Schichten aufgebracht.

Der Körpergehalt liegt bei Überzugslacken zwischen 20 und 70 %. Je nach Anforderungen sind die Lacke u. a. auf der Basis von Epoxid-, Polyester- und Alkydharzen, Polyurethan, Chlorkautschuk, Nitrokombinationen, Vinylmischpolymerisaten oder Isocyanat-Mischpolymerisaten aufgebaut.

Überzugslacke werden verwendet als Überzüge von Widerständen, Kondensatoren und elektronischen Bauteilen (Polyurethane), zur Isolation von Dynamoblechen (Dynamoblechlack, u. a. Kunstharze mit Zellulose) sowie als Abschirmung gegen elektrische Fremdfelder und zur Ableitung von Ladungen (Leitlacke, u. a. Polyesterharz mit Grafit- oder Silberzusatz), ferner als Klebelacke, Motorschutzfarben (Gesamtschichtdicken 50...100 µm), Spulenkörperlackfarben und sog. Elektroemaillen.

In zunehmendem Maß werden, wie bei den Klebstoffen beschrieben, auch wasserlösliche Lacke in der Elektrotechnik eingesetzt. Diese Lacke bestehen aus Wasser, Pigmenten, Kunstharzen mit Härter und hochmolekularen Bindemitteln.

Normung:

DIN 46448 Isolierlacke und Isolierharzmassen der Elektrotechnik, Tränkharzmassen, Typen und Prüfverfahren
DIN 46449, DIN 46456 Isolierlacke und Isolierharzmassen der Elektrotechnik, Überzugslacke, Prüfverfahren
DIN 55945 (ISO 4618–1984) Beschichtungsstoffe, Begriffe

[1] Gegen Termiten ist ein Schutz außerordentlich schwierig zu erreichen. Nur sehr harte und extrem glatte Lackoberflächen bieten den Zähnen der Termiten ausreichenden Widerstand; gegen beigemischte Gifte (Insektizide) sind Termiten meist immun bzw. werden es nach Verzehr der Lacke.

Ausreichende Elastizität, damit eine Ribbildung bei Längenausdehnung des Trägers durch Wärme verhindert wird.

Hohe Erweichungstemperatur zur Vermeidung von Kurzschlüssen oder Windungsschlüssen.

Gute mechanische Festigkeit, um Beschädigungen der Lackschicht bei der Verarbeitung des Drahtes auf hochtourigen Wickelmaschinen auszuschalten.

Gute Haftfestigkeit auf der Oberfläche des Leiters, vor allem bei Profilmaterial. Diese Eigenschaften dürfen auch bei langandauernder Beanspruchung durch Wärme, Feuchtigkeit und chemische Einwirkungen nicht wesentlich verschlechtert werden.

Lötfähige Drahtlacke müssen darüber hinaus in der Wärme des geschmolzenen Lötzinns, ohne Rückstände zu hinterlassen, gut fließen, sie werden von dem flüssigen Lötzinn verdrängt. Die Verzinnbarkeit des Kupferdrahtes muß dabei gewährleistet sein.

Lackarten und Verwendung

Der Körperanteil bei Drahtlacken liegt zwischen 25 und 50 %.

Bei der Herstellung von lackisolierten Drähten werden nacheinander mit jeweils dazwischenliegender Trocknung teilweise bis über 12 Schichten aufgebracht.

a) Öllacke (ölhaltige Lacke)

Öllacke bestehen im wesentlichen aus Lein- oder Holzöl. Sie werden heute praktisch nicht mehr verwendet. Öllacke dienten als Drahtisolationen in der Meß- und Nachrichtentechnik für Geräte und Kabel, bei denen eine Imprägnierung mit Tränklack nicht vorgenommen wurde und wo an die Alterungsbeständigkeit bei Wärmeeinwirkung keine oder nur sehr geringe Anforderungen gestellt wurden.

b) Lacke auf Kunststoffbasis (ölfreie Lacke)

Polyamid-Polyurethankombinationen haben eine hervorragende Elastizität, hohe mechanische Festigkeit, gute elektrische Isolationseigenschaften und zeigen nur geringe Alterungserscheinungen.

Das Hauptanwendungsgebiet dieser Lacke liegt im Elektromaschinenbau.

Nylonlack (Polyamidbasis) ist kältemittelbeständig. Mit Nylonlack isolierte Drähte können wegen der hohen mechanischen Festigkeit des Lackes auf schnellaufenden Wickelmaschinen verarbeitet werden.

Polyamidimidkombinationen bestehen aus Polyamiden und Polyimiden. Polyamidimidkombinationen haben eine höhere Abriebfestigkeit als reine Polyimide, ohne daß die sonstigen Eigenschaften des Polyimids schlechter werden. Diese Lacke können universell verwendet werden.

Epoxidharzkombinationen dienen zur Herstellung schmorfester Lacküberzüge bei kurzzeitig hochbelasteten Isolationen.

Weitere Drahtlacke stellt man auf der Basis von **Silikonen, gesättigten Polyestern** (sehr elastisch, ausgezeichnete mechanische Eigenschaften), **Harnstoff-Phenolharz, Polyesterimiden** und **Polyvinylacetaten** her. Auch diese Lacke werden wie die bereits beschriebenen hauptsächlich im Elektromaschinenbau verwendet.

Zur Herstellung von freitragenden Spulen wie Kreuz- und Ablenkspulen verwendet man lackisolierte Drähte, deren Lack erst nach dem Wickeln der Spule durch Wärme ausgehärtet wird.

Häufig werden auch „Sinterpulver" anstelle von Drahtlacken elektrostatisch auf Drähte aufgetragen und anschließend gesintert. Als Sinterpulver dienen u. a. Epoxidharz, Polyesterharz, Acrylharz, PVC und Styrol-Mischpolymerisate.

c) Lötbare Drahtlacke

Lötbare Drahtlacke bestehen aus linearen Polyurethanen. Sie werden eingesetzt zur Isolation von Litzen und Schaltdrähten in der HF- und Nachrichtentechnik, finden aber auch Verwendung im Kleinmotorenbau für Tauchlötungen. Besonders wirtschaftlich sind lötbare Drahtlacke bei Fließbandfertigungen.

7.22.2 Tränklacke, Imprägnierlacke

Handelsnamen: Dobeckan, Elmo, Elmotherm, Fenogarant, Insulator, Oleogarant, Siliconit, Siligarant, Tentronit

Tränk- bzw. Imprägnierlacke verleihen den mit ihnen getränkten Bauteilen einen zusätzlichen Schutz.

Anforderungen

Tränklacke sollen außer den allgemeinen Isolierstoffeigenschaften noch folgende weitere Eigenschaften besitzen:

Große **Verbackungsfestigkeit** und **Klebevermögen** bzw. mechanische Festigkeit, die auch bei warmer Maschine ausreicht, um Flieh- und Schwingungskräfte sowie Kräfte von Stoßkurzschlußströmen aufzunehmen.

Ausreichende **Geschmeidigkeit,** um Dehnungen infolge von Temperaturschwankungen und Erschütterungen aufzufangen.

Gutes Füllvermögen zur Vermeidung von Hohlräumen, damit eine gute Wärmeableitung, die Fernhaltung von Feuchtigkeit und die elektrischen Isolationseigenschaften gewährleistet sind.

Je nach der Verwendung **Beständigkeit** gegen Säuren, Laugen, Schimmelpilze, Bakterien und Insektenfraß (tropenbeständig) sowie explosible Gas-Luft-Gemische.

Bei der Verarbeitung sind gutes **Eindringvermögen** bis in die tiefsten Wickellagen und sichere Trocknung bei niedrigen Temperaturen in kurzer Zeit erwünscht.

Silikonkautschuk bzw. -gummi wird in der Elektrotechnik für wärmebeständige, flammwidrige Leitungsisolationen wie Kabeleinführungen bei Öfen und für Isolierschläuche sowie als glasfaserverstärktes Band zur Isolation von Wicklungen und manchmal als Dielektrikum bei Kondensatoren verwendet. Mit Silikonkautschuk beschichtete Isolatoren besitzen auch bei hoher Luftfeuchtigkeit einen großen Oberflächenwiderstand.

Ferner stellt man u. a. wärmebeständige Dichtungen und Dichtungsmanschetten daraus her. Silikonkautschuk kann leicht mit Metall verklebt werden. Weitere Verwendungsmöglichkeiten sind im Abschnitt 6.2.4 Synthesekautschuk angegeben.

Silikonkautschuk ist physiologisch verträglich und dient, da er problemlos thermisch sterilisiert werden kann, zur Herstellung von Silikongummiprodukten im medizinischen Bereich.

Kaltvernetzbarer Silikonkautschuk (Silopren, Silgel) dient zur Einbettung von elektrischen und elektronischen Bauteilen, als Dichtungsmaterial bei Kabeln und als Kleber. Das Material wird pastenförmig verarbeitet, es wirkt stoß- und erschütterungsdämpfend, schützt gegen Korrosion und gewährleistet aufgrund der guten Elastizität in einem großen Temperaturbereich eine spannungsfreie Einbettung. Kaltvernetzter Silikonkautschuk ist gummielastisch, jedoch nicht thermoplastisch. Das Material ist auch als klare, durchsichtige Vergußmasse im Handel.

Aus kalt vernetzbarem Silikonkautschuk können auch leicht elastische Formen und Modelle hergestellt werden.

Silikonharze und -lacke benötigen zur Härtung meist einen Härter bzw. Vernetzer, teilweise auch Wärme und Druck und dienen in der Elektrotechnik vor allem als Isolation im Elektromaschinenbau. Sie werden als Isolier- oder Tränklack und als Tränkharz bei Leitern, Spulen, Wicklungen, elektronischen Schaltungen u. dgl. verwendet. Bei Nutenisolationen kleidet man die Nuten mit Glasseidegewebe aus, tränkt mit Harz und härtet.

Silikonharz- oder Silikonlack-Isolationen werden hauptsächlich bei hochbelasteten, in feuchter Atmosphäre oder in hoher Umgebungstemperatur arbeitenden Maschinen und Transformatoren wie Bahnmotoren, Lasthebemagnete, wasserunempfindliche Maschinen und Transformatoren im Bergbau, Pumpstationen usw. eingesetzt.

Bei silikonisierten Maschinen wird bei gleicher Baugröße wegen der höheren zulässigen Dauertemperatur eine um etwa 30 % größere Leistung erreicht als bei herkömmlicher Lack- und Harzisolation.

Silikonlack wird oft als dauerelastische Schutzschicht für bestückte Platinen benutzt.

Häufig werden Papier und Textilien mit Silikonlack imprägniert, um sie wasserabstoßend zu machen. Mit Silikonharz bzw. -lack getränktes Glasgewebe ist auch in feuchter Umgebung ein guter Isolator und wird im Transformatorenbau und in der Hochfrequenztechnik verwendet.

Unter Verwendung von Glasfasern, Schiefer- oder Glimmermehl als Füllstoffe stellt man mit Silikonharz schlagfeste und bis 250 °C wärmebeständige Preßmassen her, die u. a. im Elektromaschinenbau verwendet werden.

© Holland + Josenhans

7.22 Isolierlacke

Isolierlacke werden in flüssiger Form verarbeitet. Sie bestehen aus einem Lösungsmittel und aus filmbildenden Stoffen, sog. „Körper".

Als Lösungsmittel dienen meist Alkohole, Benzin, Benzol, Toluol, Terpentinöl und Butanol[1]. In zunehmendem Maß werden jedoch kohlenwasserstoffhaltige Lösungsmittel für Lacke durch Lösungsmittel auf Wasserbasis ersetzt.

Der zusammenhängende isolierende Lackfilm entsteht während des Trocknens entweder durch Verdunsten des Lösungsmittels (physikalische Trocknung) oder nach dem Verdunsten des Lösungsmittels durch chemische Reaktion (Aushärtung) des vorher noch klebrigen Lackkörpers.

Zur ersten Gruppe gehören u. a. die Zellulose- und Spirituslacke. Zelluloseverbindungen, Schellack u. dgl. sind in Aceton oder Spiritus gelöst. Beim Trocknen verfilzen die Fadenmoleküle und bilden den Film.

Bei der zweiten Gruppe besteht der „Körper" aus kürzeren verzweigten Molekülen, die mit Hilfe des Luftsauerstoffes durch Oxidation, durch Polymerisation, Polykondensation oder bei Wärme vernetzen. Zu dieser Gruppe gehören die Lacke auf Kunstharzbasis.

Seltener verwendet man heute trocknende Öle. Dies sind u. a. besonders behandeltes Leinöl, Holzöl[2] oder Trane. Die Filmbildung (Verharzung) erfolgt unter dem Einfluß des Luftsauerstoffs, durch Polymerisation oder Polykondensation. Ölhaltige Kunstharzlacke werden auch als ölmodifizierte Kunstharzlacke bezeichnet.

Man unterscheidet in der Elektrotechnik:

1. Drahtlacke,
2. Tränklacke,
3. Überzugslacke.

7.22.1 Drahtlacke

Handelsnamen: Fenogarant, Formadur, Icdal, Perdurex, Supradurit, Terebec, Utanol, Utapermin

Drahtlacke dienen zur Isolation von Drähten, die z. B. zu Spulen, Wicklungen oder Litzen weiterverarbeitet werden.

Anforderungen

Drahtlacke sollen außer den bei Isolierstoffen üblichen Anforderungen folgende Bedingungen erfüllen:

Hohe Durchschlagsfestigkeit bei dünnster Schichtstärke, um eine gute Ausnutzung des Wickelraumes zu erreichen (z. B. guter Nutenfüllfaktor bei elektrischen Maschinen).

[1] Sämtliche Lösungsmittel sind Kohlenwasserstoffverbindungen.
[2] Leinöl wird aus Flachssamen, Holzöl aus der nußähnlichen Frucht des in Ostasien heimischen Ölfirnisbaumes gewonnen.

© Holland + Josenhans

7.21 Silikone (SI)

Handelsnamen: Elastosil, Silastic, Silgel, Silgard, Silopren

Herstellung

Die Ausgangsmaterialien, feingemahlenes Silizium (vgl. Abschnitt 8.1) und Methylchlorid (CH_3Cl, Herstellung aus Chlor und Erdgas), ergeben zusammen unter Anwesenheit von Katalysatoren ein Gemisch von sog. Chlorsilanen. Durch fraktionierte Destillation wird dieses Gemisch aufgeteilt in die einzelnen Chlorsilane

a) Methylmonochlorsilan $(CH_3)_3\,SiCl$,
b) Methyldichlorsilan $(CH_3)_2\,SiCl_2$ und
c) Methyltrichlorsilan $(CH_3)\,SiCl_3$.

Über eventuelles Mischen der einzelnen Chlorsilane, chemische Umsetzungen mit Wasser und abschließende Polykondensation entstehen daraus

a) Silikonöl,
b) Silikonkautschuk und
c) Silikonharz.

Eigenschaften

Silikone werden in den verschiedensten Zustandsformen hergestellt, als Öl, Fett oder Paste, kautschukartig und als Lack oder Harz.

Silikone sind sehr wasserabstoßend und isolieren daher auch bei hoher Luftfeuchtigkeit. Die chemische Beständigkeit ist gut.

Silikonöl, -fett, -paste

Spezifischer Widerstand: etwa $10^{15}\ \Omega \cdot cm$
Durchschlagsfestigkeit: 10...30 kV/mm

Verwendbar: –60 °C...+200 °C (Fett –70 °C...+250 °C); $\varepsilon = 2...3$

Silikonöl ist eine farblose, geruchlose Flüssigkeit, die sich fettig anfühlt.

Seine Zähigkeit ist weit weniger von der Temperatur abhängig als bei Mineralölen. Es hat jedoch schlechtere Schmiereigenschaften als diese.

In Benzol, Toluol, chlorierten Kohlenwasserstoffen und Ether ist Silikonöl löslich, in Mineralölen unlöslich.

Silikonkautschuk, Silikongummi

Dichte:	etwa 1,3 g/cm³
Spezifischer Widerstand:	etwa $10^{14}\ \Omega \cdot cm$
Durchschlagsfestigkeit:	20...45 kV/mm
Verwendbar:	–60 °C...+200 °C (kurzzeitig bis 250 °C); $\varepsilon = 3...10$

© Holland + Josenhans

Silikonkautschuk kann ähnlich Natur- oder Kunstkautschuk vulkanisiert werden. Als Vulkanisationsmittel dienen sog. Peroxide (kein Schwefel), als Füllstoffe verwendet man bis zu 60 % Quarz, Zinkoxid oder Titandioxid (kein Ruß). Die Vulkanisation erfolgt bei 130...200 °C.

Silikongummi hat eine gute Wärmeleitfähigkeit.

Aceton und Benzin wirken quellend, Wasserdampf und Heißwasser, vor allem aber konzentrierte Säuren und Laugen, greifen Silikongummi an.

Mechanische Festigkeit und Abriebfestigkeit sind schlechter als bei Natur- oder Kunstgummi. Die Temperaturbeständigkeit liegt jedoch sowohl im negativen wie im positiven Temperaturbereich beträchtlich höher.

Silikongummi und Silikonlack verbrennen bei starker Flamme zu SiO_2 („weißer Ruß").

Silikonharz, -lack

Dichte:	etwa 1 g/cm³
Spezifischer Widerstand:	$10^{16}\ \Omega \cdot cm$
Durchschlagsfestigkeit:	bis 40 kV/mm
Verwendbar:	bis 200 °C

$\varepsilon = 2...3$
$\tan \delta = 2 \cdot 10^{-3}$

Silikonharz bzw. -lack ist farblos bis leicht gelblich und aushärtbar. Zur Aushärtung ist eine Temperatur von etwa 250 °C erforderlich. Damit Lack oder Harz auf einem zu isolierenden Leiter haften, muß dieser vorher mit Glasseide umsponnen werden.

Bei der Herstellung von Silikonlack sind etwa 50 % Harz in Toluol, Benzin oder Benzol gelöst.

Weitere spezielle Eigenschaften vergleichen Sie auch bei Verwendung.

Verwendung

Silikonöl wird in der Elektrotechnik als Transformator- und Schaltgeräteöl verwendet. Es bildet auch nach längerem Betrieb praktisch keinen Schlamm und zeigt keine Verharzungserscheinungen. Ferner dient es als Hydrauliköl, Schmieröl und Zusatz für wasserabstoßende Hautschutzsalben, Autopolier-, Imprägnier-, Isolier- und Trennmittel. Silikonöl ist auch als Spray im Handel.

Silikonfett stellt man aus Silikonöl und einem Verdickungsmittel, z. B. feingemahlenem SiO_2, her.

Wegen seiner guten elektrischen Isolationseigenschaften und der guten Wärmeleitfähigkeit verwendet man Silikonfett u. a. zur Füllung von Transistorengehäusen. In dem bei Eigenschaften angegebenen Temperaturbereich wird das Fett weder flüssig, noch verhärtet es. Teilweise dient es auch als Schmiermittel.

Silikonpaste entsteht durch Mischen von Silikonöl mit Grafitpulver. Diese Paste übertrifft alle üblichen Heißlagerfette in der Temperaturbeständigkeit.

© Holland + Josenhans

Ziele der Hersteller der Faserverbundwerkstoffe sind: die Herstellung noch festerer, leichterer, steiferer, dehnfähigerer und preiswerter Fasern; die Herstellung noch temperaturbeständigerer, schlagzäher und schnell zu verarbeitender Harze sowie die Beherrschung der Grenzschichten Faser/Harz und die Entwicklung rationeller Verarbeitungsverfahren.

Als zur Zeit wichtigste Fasern zur Herstellung von Faserverbundwerkstoffen für vielfältige Konstruktionsteile können Carbonfasern und Glasfasern betrachtet werden. Je nach dem Einsatzbereich bzw. den erforderlichen Eigenschaften werden FVW mit den festeren, aber auch teureren Carbonfasern oder mit Glasfasern verwendet.

Eigenschaften

Die Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe hängen stark von den verwendeten Fasern, deren Verarbeitung (u. a. Hybridgewebe und Webart) und von den verwendeten Harzen ab. Während Faserart und Faserverarbeitung vor allem die mechanischen Eigenschaften bestimmen, sind die thermische und chemische Beständigkeit hauptsächlich vom verwendeten Harz abhängig.

Polyesterharze werden von konzentrierter Schwefelsäure, starken Laugen und Aceton angegriffen, Epoxidharze sind außerdem unbeständig gegen konzentrierte Salpetersäure und Chlorkohlenwasserstoffe (CKW).

Faserverbundwerkstoffe sind gut spanend bearbeitbar, Verbindungen werden meist durch Kleben, seltener durch Schrauben oder Nieten hergestellt.

Die Eigenschaften der einzelnen Faserverbundwerkstoffe müssen jeweils den Herstellerangaben entnommen werden.

Carbonfasern besitzen folgende Eigenschaften:

Dichte:	1,5... 2 g/cm^3
Zugfestigkeit:	0,9 kN/mm^2 (isotrope Faser)
	2...2,5 kN/mm^2 (HM-Faser)
	2,5...3 KN/mm^2 (HF-Faser)
Elastizitätsmodul:	40 kN/mm^2 (isotrope Faser)
	200... > 400 kN/mm^2 (HM- und HF-Faser)
Bruchdehnung:	< 1 %...2 %
Spez. elektrischer Widerstand:	10 μΩ · cm (isotrope Faser)
	0,5...2 μΩ · cm (HM-, HF-Faser)

Kohlenstoffasern besitzen bei geringem Gewicht eine hohe Festigkeit und ein hohes Elastizitätsmodul, die Bruchdehnung ist gering, der thermische Ausdehnungskoeffizient in Faserrichtung ist praktisch null. In oxidierender Atmosphäre sind die Fasern bis 350 °C beständig, unter Schutzgas oder im Vakuum sind Carbonfasern bis 3000 °C einsetzbar. Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des Kohlenstoffs sind elektrostatische Aufladungen ausgeschlossen. Das Material ist beständig gegen Säuren, Laugen und Lösungsmittel, jedoch nicht gegen oxidierend wirkende Medien. Kohlenstoffasern sind auch gegenüber hohen radioaktiven Strahlendosen resistent.

© Holland + Josenhans

Glasfasern (GFK, Klammerwerte) besitzen folgende grundsätzliche Eigenschaften:

Dichte:	1,5...2 g/cm^3 (1,5...2,5 g/cm^3)
Zugfestigkeit:	1,2...2 kN/mm^2 (0,5...1 kN/mm^2)
Dauertemperatur:	je nach Harz bis 150 °C

Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischen Harzen bzw. Kunststoffen besitzen folgende Eigenschaften:

Dichte:	1... < 2 g/cm^3
Zugfestigkeit:	< 50...200 N/mm^2
Reißdehnung:	< 1... > 200 %

Verwendung

In der Elektrotechnik werden aus Faserverbundwerkstoffen Hochspannungsisolatoren, Teile für Hochspannungsschalter und großflächige Isolierteile wie Trennwände hergestellt. Die Kunststoffe dienen ferner als Abdeckung für Radar- und Richtfunkantennen und als Schutz für der Witterung ausgesetzte Geräte. Außerdem stellt man daraus Isolierteile in der Hochfrequenztechnik, im Schalter- und Relaisbau her. Faserverstärktes Epoxidharz dient auch als Basismaterial für Leiterplatten oder gedruckte Schaltungen. Aus mit Aluminium metallisierten, faserverstärkten Epoxidharzplatten werden manchmal auch Reflektoren und Parabol- bzw. Richtfunkantennen hergestellt.

In der gesamten Technik sind die Anwendungen der Faserverbundwerkstoffe (CFK und GFK) außerordentlich vielfältig. Als Innovationen werden stetig neue Anwendungen erschlossen.

Faserverbundwerkstoffe werden z. B. verwendet zum Bau von Gehäusen, Behältern (einschließlich Koffer), Booten, Sportgeräten (u. a. Skier, Surfbretter, Tennisschläger, Stabhochsprungstäbe), im Fahrzeugbau (Pkw-Karosserieteile, Wohnwagen, Omnibusse und Bahnen), im Flugzeugbau (Leitwerke und Steuerklappen, Tragflächen und Rumpf von Segelflugzeugen), in der Raumfahrttechnik, in der Bau- und Möbelindustrie sowie zur Herstellung von Rohren und Sandwichbauelementen. Im gesamten Maschinenbau werden viele Einzelteile aus FVW hergestellt.

Normung:

DIN 29965 Kohlenstoffasern, Kohlenstoffilamentgarne, Lieferbedingungen
DIN 65147 Gewebe aus Kohlenstoffilamentgarn
DIN 65184 Hochfeste Kohlenstoffilamentgarne

Die Prüfung von Laminaten aus Kohlenstoffasern und Reaktionsharzen ist in DIN EN 2561 (1990), DIN EN 2562 (1990), DIN EN 2563 (1990), DIN EN 2597 (1991), DIN EN 2850 (1992) und DIN EN 3675 (1992) festgelegt. Die angegebenen Normen werden hauptsächlich im Bereich der Luftfahrt angewandt.

© Holland + Josenhans

Herstellung

Ausgangsmaterialien für die Herstellung der Faserverbundwerkstoffe sind Kunstharze, die mit Fasern verstärkt werden. Als Herstellungsverfahren werden zum Beschichten von Geweben (Halbzeug) z. B. ein Schleuder-, Vakuum- oder Naßlaminierverfahren angewandt. Auch Heiß- oder Kaltpressen oder eine Wickeltechnik kommen zur Anwendung. Viele Teile, meist aus Thermoplasten, werden durch Spritzgießen oder Spritzpressen hergestellt. Der Aushärtungsprozeß bei Duroplasten, z. B. flächige Faserprodukte (Prepregs) dauert zwischen 2 und 5 Stunden, die Aushärtung erfolgt bei einem Druck von 3 bis 5 bar und einer Temperatur zwischen 150 °C und 200 °C, die Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit beträgt 3 °/min. bis 5 °/min. Der Faseranteil der Faserverbundwerkstoffe liegt meist in der Größenordnung von 60 Volumen-% (etwa 65 Gewichts-%).

Als Harze werden hauptsächlich verwendet: Epoxid-, Polyester-, Phenol- und Polyimidharze.

Als Fasern werden hauptsächlich verwendet: Glasfasern (GFK, glasfaserverstärkte Kunststoffe), Aramidfasern (Polyamid, Kevlar, AFK), PAN-Fasern (Polyacrylnitril, Dralon) und Kohlefasern, meist Carbonfasern genannt (CFK).

Stahlfasern, Nylon und besonders die typischen Naturfasern wie Leinen sowie Zelluloseerzeugnisse wie Papier werden ebenfalls, jedoch seltener, als Füllmaterial verwendet.

Alle Faserfüllstoffe werden unabhängig vom verwendeten Rohstoff als textile Fasern oder textile Produkte bezeichnet.

Außer duroplastischen Kunststoffen – Basis Gießharze – werden auch thermoplastische Harze und Kunststoffe zur Herstellung von FVW verwendet, dies sind u. a. Polykarbonat (PC), Polyphenylensulfid (PPS), Polystyrol (PS), Polypropylen (PP) und Polytetrafluorethylen (PTFE). Bei Thermoplasten mit Faserverstärkung ist eine Faserauswahl erforderlich, um eine gute Haftung zwischen der Faser und dem Kunststoff sicherzustellen.

Fasern aus Glas oder Kunststoffen einschließlich Carbonfasern können in beliebiger Länge hergestellt werden, so daß bei großen Konstruktionsteilen die Fasern als eine Faser ohne Unterbrechung im Werkstück verlaufen.

Außer als Vlies, Gewebe, Bänder (Gelege) oder Schläuche werden die Fasern auch als Rovings geliefert. Rovings sind Faserstränge, bestehend aus mehreren tausend Einzelfasern. Der Durchmesser einer Einzelfaser liegt zwischen 6 µm und 10 µm. Rovings können als Strang verwendet oder durch Weben oder Flechten weiterverarbeitet werden .

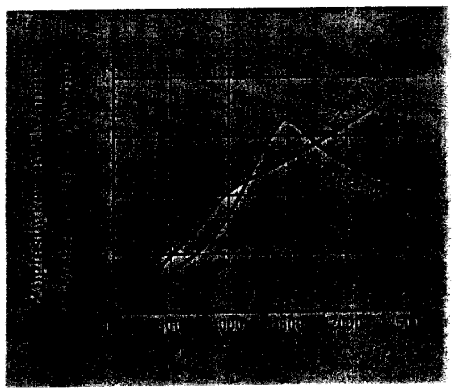
Je nach den geforderten Eigenschaften des Endproduktes werden z. B. Gewebe aus verschiedenen Fasern hergestellt (Hybridisierung). Teilweise erfolgt die Mischung im Faden, oder Kette und Schuß bestehen aus unterschiedlichen Fasern. Durch Imprägnierung von Geweben mit härtbaren Reaktionsharzen stellt man sog. Prepregs her.

Während Glas- und Kunststoffasern durch Ziehen oder Spritzen hergestellt werden, erfordert die Erzeugung von Kohlenstoffasern besondere Verfahren.

© Holland + Josenhans

Kohlenstoffasern bestehen aus reinem Kohlenstoff mit graftischer Struktur (hoch anisotropes Schichtgitter). In der Schichtebene des Kristalls sind die Kohlenstoffatome außerordentlich fest gebunden (theoretisch läßt sich eine Zugfestigkeit von bis zu 100 kN/mm² ableiten). Zwischen den Schichtebenen sind die Bindungskräfte dagegen nur sehr gering. Die Kristalle in Grafitfasern müssen daher so ausgerichtet werden, daß die Schichtebenen weitgehend in Richtung der Faserachse verlaufen. In der Praxis werden 3 Faserklassen mit unterschiedlichen Strukturen und Eigenschaften unterschieden. Isotrope Fasern sind mechanisch relativ gering belastbar. Sie bestehen aus glasartigem Kohlenstoff mit grafitischer Struktur, jedoch mit einem geringen kristallinen Ordnungsgrad. Bei Hochmodulkohlenstoffasern HM- oder HF-Kohlenstoffasern sind die Schichtebenen der Kristallite weitgehend (HM-, Hochmodulfaser) oder vorwiegend (HF-, hochfeste Faser) parallel zur Faserachse angeordnet. Die einzelnen Kristallite sind bändchenförmig etwa 6 nm breit und 100 nm lang.

Kohlenstoffasern werden durch thermischen Abbau, Pyrolyse, einer Ausgangsfaser hergestellt. Die Eigenschaften der späteren Carbonfaser sind von dem verwendeten Faserrohstoff, den Eigenschaften und der Qualität der Ausgangsfaser und der Herstellungstechnologie abhängig. Zur Zeit werden Carbonfasern meist aus Polyacrylnitrilfäden (PAN) hergestellt. Pech- und Zellulosefasern werden selten verwendet. In einer 1. Verfahrensstufe wird die Ausgangsfaser bei 200 °C bis 300 °C durch oxidative und/oder chemische Behandlung mit oder ohne Faserstreckung stabilisiert, die Faser wird für die Pyrolyse in eine unschmelzbare Form übergeführt. In der 2. Verfahrensstufe, Schutzgas oder Vakuum, erfolgt bei 1600 °C das Carbonisieren. Die Kohlenstoffaser entsteht durch thermischen Abbau der stabilisierten Ausgangsfaser. Je nach Vorbehandlung erhält man eine isotrope oder eine HF-Kohlenfaser. In einer 3. Verfahrensstufe wird bei 3000 °C durch Grafitieren eine gezielte Kristallbildung erreicht. Diese Hochtemperaturbehandlung wird mit oder ohne Faserstreckung durchgeführt, es entstehen HM-Kohlenstoffasern.



Die Temperaturbehandlung bestimmt sehr wesentlich die Eigenschaften der Kohlenstoffaser. Während das Elastizitätsmodul[1] mit steigender Temperatur zunimmt, durchläuft die Zugfestigkeit der Kohlenstoffaser bei 1200 °C bis 1600 °C ein Maximum, Diagramm Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Verfahrenstemperatur.

[1] Elastizität ist die Eigenschaft eines Körpers, einer formändernden Kraft federnd nachzugeben und nach Aufhören dieser Kraft elastisch in die ursprüngliche Form zurückzukehren. Bei Überschreiten der **Elastizitätsgrenze** entstehen bleibende Verformungen. Das **Elastizitätsmodul**, E-Modul, ist die Kraft in N/mm², die einen Körper auf die doppelte Länge dehnen würde. Der Kehrwert des Elastizitätsmoduls ist der Elastizitätskoeffizient. Elastizitätsmodul und Elastizitätskoeffizient sind ein Maß für die Elastizität, Dehnung und Biegsamkeit eines Werkstoffs.

© Holland + Josenhans

Fertigstellung der gesamten Mischung[1] gießt man das flüssige Harz in die gewünschte Form. Das Harz härtet dann aus[2]. Durch Wärme kann die Härtungszeit teilweise beträchtlich vermindert werden. Findet die Aushärtung bei Raumtemperatur statt, spricht man von kalthärtenden Harzen; ist zur Aushärtung zusätzlich noch Wärme erforderlich, spricht man von warmhärtenden Harzen.

Eigenschaften

Dichte:	reines Harz 1,0...1,2 g/cm^3, mit Füllstoff bis 1,9 g/cm^3
Spezifischer Widerstand:	$>10^{13}\ \Omega \cdot$ cm
Durchschlagsfestigkeit:	etwa 50 kV/mm
Zulässige Dauertemperatur:	80...120 °C
Zugfestigkeit:	50...70 N/mm^2

$\varepsilon = 3...4$

Gießharze sind nach der Aushärtung Duroplaste.

Reine Harze sind glasklar bis goldgelb; sie können je nach dem Anteil des Härters auch flexibel hergestellt werden.

Epoxidharze nehmen nur sehr wenig Wasser auf und sind beständig gegen Witterungseinflüsse. Verdünnte Säuren und Laugen, Alkohol und Öle sowie Lösungsmittel greifen nicht an. Aceton wirkt lösend.

Flüssige Harze dringen leicht in alle Zwischenräume ein und eignen sich vorzüglich zum Einbetten von Wicklungen.

Durch Mischen von Metallpulver (meist Silber oder Gold) mit Epoxidharzen können die Harze elektrisch leitend gemacht werden. Vergleichen Sie auch Abschnitt 7.22 Klebstoffe (elektrisch leitfähige Kleber).

Ausgehärtete Epoxidharze haben eine ausgezeichnete Haftfestigkeit, große Härte und gute mechanische Festigkeit. Beim Gießen tritt ein Schwund von 0,5 % ein (Polyesterharz etwa 8 %). Die ausgehärteten Gußstücke können nachträglich spanabhebend bearbeitet werden.

Dünnflüssige, noch unvernetzte Epoxidharze bilden hautreizende Dämpfe. Ebenso sind Katalysatoren und Härter von Polyester- und Epoxidharzen teilweise gesundheitsgefährdend. Beim Verarbeiten ist daher Vorsicht geboten, die Herstellerangaben zur Verarbeitung sind unbedingt zu beachten. Ausgehärtete Gießharze sind toxikologisch unbedenklich.

Epoxidharze brennen mit rußender gelber Flamme und Phenolgeruch; Polyesterharze brennen mit rußender hellgelber Flamme und süßlichem Geruch.

[1] Nach dem Einarbeiten des Härters in das Harz steht nur eine begrenzte Verarbeitungszeit bis zum Beginn der Härtung zur Verfügung, die sog. Topfzeit. Je nach Harz, Härter und Umgebungstemperatur liegt die Topfzeit zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden. Durch Aufbewahrung in Kühlschränken kann bei manchen Harzen die Topfzeit beträchtlich verlängert werden.

[2] Nach etwa $^1/_2$ ...3 Stunden kann die Form entfernt werden. Die vollständige Aushärtung ist jedoch erst nach etwa 6...48 Stunden abgeschlossen.

© Holland + Josenhans

Verwendung

Wegen ihrer besseren elektrischen Isolations- und sonstigen Eigenschaften, vor allem bei Wärme, werden in der Elektrotechnik hauptsächlich Epoxidharze als Gießharz verwendet.

Warmhärtende Epoxidharze werden verwendet zum Ausgießen von Spulen und Wandlern, zur Wicklungsisolation, zur Herstellung von Gehäusen, Formteilen und Freiluftisolatoren in der Hochspannungstechnik. Bei letzteren werden Anschlußbolzen u. dgl. in einem Arbeitsgang mit verankert.

Kalthärtende Epoxidharze sind bis etwa 90 °C verwendbar und dienen für Kabelmuffen und Endverschlüsse, zur Wicklungsisolation von Unterwassermotoren, für Isolationen bei explosionsgeschützten Geräten und zum Umhüllen oder Einbetten von Bauelementen oder Baugruppen der Nachrichten- und Energietechnik sowie zur Abdeckung von bestückten Platinen.

Elektrisch leitende Epoxidharze werden u. a. zum Kleben und Verbinden verschiedener Bauelemente in elektronischen Schaltungen verwendet und ersetzen somit die Lötverbindungen.

Kalthärtende Polyesterharze verwendet man u. a. zum Einbetten von kleinen Wicklungen, z. B. Hochspannungsspulen, Zeilentrafos in Fernsehgeräten und Steuertrafos. Epoxid- und Polyesterharze dienen ferner als Lackrohstoffe und zur Herstellung der Faserverbundwerkstoffe.

Mit Epoxidharzen können bei nicht zu hohen Festigkeitsansprüchen Metallteile miteinander verklebt werden. Epoxidharzpulver dient als Beschichtungsmaterial und wird meist im Wirbelsinterverfahren aufgebracht. Mit Epoxidharz getränktes und ausgehärtetes Papier oder Glasgewebe wird auch als Basismaterial für Leiterplatten und gedruckte Schaltungen verwendet.

Normung:

DIN 16945 (ISO 3521–1990, ISO 7028–1986, ISO 7327–1988, ISO 9702–1992) Reaktionsharze, Reaktionsmittel und Reaktionsharzmassen, Prüfverfahren
DIN 16946 Teil 2 Reaktionsharzformstoffe; Gießharzformstoffe, Typen
DIN 16914 (ISO 10082–1991) Phenolharze, Begriffe und Eigenschaften
DIN 16916 (ISO 8244–1988) Reaktionsharze, Phenolharze, Begriffe und Einteilung
DIN 55958 (ISO 472–1988) Harze, Begriffe

7.20 Faserverstärkte Werkstoffe, Faserverbundwerkstoffe (FVW)

In zunehmendem Maß werden faserverstärkte Werkstoffe, auch Faserverbundwerkstoffe genannt, eingesetzt. Seither besonders Leichtmetallen vorbehaltene Anwendungsbereiche werden von Faserverbundwerkstoffen eingenommen. Diese Materialien sind leichter, sie sind in der Festigkeit und teilweise in der Temperaturbeständigkeit den Leichtmetallen überlegen.

© Holland + Josenhans

Eigenschaften

Dichte:	1,4...1,5 g/cm^3
Spezifischer Widerstand:	etwa 10^{10} Ω · cm
Durchschlagsfestigkeit:	etwa 10 kV/mm
Dauertemperatur:	65 °C Harnstoffharz
	130 °C Melaminharz
Zugfestigkeit:	70...100 N/mm^2 (Harnstoffharz-Hartpapier)
	100...180 N/mm^2 (Melaminharz-Hartpapier)

Aminoplaste sind Duroplaste.

Aminoharze sind farblos. Durch Verwendung von hellen Füllstoffen (z. B. Holzmehl) sind Aminoplaste meist weiß oder haben lebhafte, bunte Farben. Teilweise preßt man drei Farbschichten übereinander oder stellt Edelholzmaserungen (bedrucken der zweitobersten Schicht) her. Beim Aushärten löst sich häufig der Füllstoff völlig auf, so daß eine homogene (gleichmäßige) Struktur entsteht.

Gegenüber Phenoplasten sind Aminoplaste lichtechter und besitzen eine höhere Kriechstromfestigkeit. Sie sind ferner hart und bruchfest.

Aminoplaste sind gegen Alkohol, Benzin, Benzol, Äceton, Öl und schwache Säuren beständig. Laugen und starke Säuren greifen an.

Spanabhebende Bearbeitung ist mit Hartmetallwerkzeugen gut möglich. Verbindungen werden durch Kleben hergestellt.

Aminoplaste sind nicht brennbar, sie verkohlen in der Flamme, es entsteht ein Fischgeruch oder ein Geruch nach Ammoniak (Salmiakgeist).

Verwendung

Aminoplaste haben in der Elektrotechnik und im Maschinenbau nur noch eine untergeordnete Bedeutung, sie wurden durch die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Kunststoffe ersetzt.

Aminoplaste wurden wegen ihrer guten elektrischen Isolationseigenschaften für helle Installationsteile wie Schalter, Steckdosen, Stecker, Klemmen und Abdeckungen verwendet. Bereits bei der Herstellung der Preßteile können Metalle, z. B. Bolzen, mit eingepreßt werden. Außerdem stellte man Skalen, Drehknöpfe und Gehäuse, z. B. helle Telefonapparate, aus Aminoplasten her.

Melaminharz dient auch als Gießharz, Zusatz für Einbrennlacke und Klebemittel für Holzspan- und Faserplatten.

Glasfaserverstärktes Melaminharz wird u. a. in der Schiffselektronik und im Flugzeugbau verwendet.

Aus Harnstoffharz wird ein wärme- und schallisolierender Schaumstoff hergestellt, der unter dem Namen Iporka im Handel ist.

© Holland + Josenhans

7.19 Gießharze

Man unterscheidet bei den Gießharzen:

1. Polyesterharze (Alkydharze, UP)

Handelsnamen: Alperit UP, Alpolit, Dobeckan, Durafol, Leguval, Markon, Palatal, Polyleit, Resipol, Vestopal

2. Epoxidharze (Ethoxylinharze, EP)

Handelsnamen: Araldit, Dobeckote, Dufon, Epikote, Epoxin, Grilonit, Lekutherm, Rütapox

3. Phenol- und Melaminharze (PF, MF)

4. Polyurethanharze (PUR)

Vergleichen Sie auch die Abschnitte 7.12 Polyester, 7.15 Vernetzte Polyurethane, 7.17 Phenoplaste und 7.18 Aminoplaste.

Herstellung

1. Polyesterharze

Durch sog. Veresterung von zweiwertigem Alkohol mit organischen Säuren erhält man ungesättigten Polyester[1]. Durch Zusatz von Katalysatoren und Beschleunigern findet durch Polymerisation eine Vernetzung der Makromoleküle und damit die Aushärtung statt (vernetzter bzw. gesättigter Polyester).

2. Epoxidharze

Ausgangsmaterial für Epoxidharze ist Propylen ($CH_3 \cdot CH = CH_2$), eine ungesättigte Kohlenwasserstoffverbindung, die man aus Erdöl gewinnt. Mittels verschiedener Zusätze entsteht nach mehreren chemischen Umsetzungen das noch schmelzbare Epoxidharz. Zur Vernetzung des langkettigen Harzes sind ebenfalls wieder Härter oder Katalysatoren erforderlich. Die Bildung des vernetzten, ausgehärteten Epoxidharzes erfolgt durch Polyaddition.

Polyester- und Epoxidharze werden, sofern sie nicht als fertige Werkstücke in den Handel kommen, im ungesättigten Zustand geliefert. Erst vor der Verarbeitung werden die Harze mit Katalysatoren, Beschleunigern oder Härtern gemischt, die flüssig oder als Pasten mitgeliefert werden.

Bei beiden Harzsorten können gegebenenfalls noch Füllstoffe zugesetzt werden, z. B. Glas- oder Quarzmehl, Talkum, Kreide oder Farben in Form von Metalloxiden. Nach

[1] Beim ungesättigten Polyester sind noch freie OH- und COOH-Gruppen, d. h. reaktionsfähige Stellen, vorhanden.

© Holland + Josenhans

Preßmassen

Mehlförmige oder schnitzelförmige Füllstoffe werden mit Phenolharz gemischt. In Pressen erhält das Werkstück bei hohem Druck und etwa 150 °C seine endgültige Form und härtet in wenigen Minuten aus.

Schichtpreßstoffe

Holzplatten (Furnier), Papier- oder Gewebebahnen werden mit dünnflüssigem Phenolharz getränkt. Mehrere geharzte Bahnen legt man übereinander und preßt sie in Etagenpressen. Bei etwa 150 °C härtet der Werkstoff aus.

Eigenschaften

Die Eigenschaften der Phenoplaste werden vom Füllstoff beeinflußt, liegen aber etwa in der gleichen Größenordnung.

Dichte:	etwa 1,4 g/cm^3, mit Gesteinsmehl etwa 1,8 g/cm^3
Spezifischer Widerstand:	$10^{11}\ \Omega \cdot$ cm
Durchschlagsfestigkeit:	10...20 kV/mm
Zugfestigkeit:	15...30 N/mm^2 Hartpapier, 50...100 N/mm^2 Hartgewebe
Zulässige Dauertemperatur:	100...150 °C

$\varepsilon = 5...15$
$\tan \delta = 4...40 \cdot 10^{-2}$

Phenoplaste sind Duroplaste.

Phenoplaste haben nur dunkle Farben und sind schlechte Wärmeleiter.

Besonders bei der Verwendung von organischen Füllstoffen sind Phenoplaste feuchtigkeitsempfindlich. Witterungseinflüsse müssen daher u. U. durch Verwendung eines Schutzlackes ferngehalten werden.

Schwache Säuren und Laugen sowie viele organische Lösungsmittel greifen nicht an. Phenoplaste können nur spanabhebend bearbeitet werden (Hartmetallwerkzeuge). Schweißen ist nicht möglich. Verbindungen stellt man durch Schrauben, Nieten oder Kleben (Kontaktkleber) her.

Phenoplaste verkohlen in der Flamme; es entsteht ein stechender Geruch nach Phenol und Formaldehyd. Brennen sie außerhalb weiter, so enthält der Werkstoff einen hohen Anteil eines organischen Füllstoffes.

Verwendung

Preßmassen, Hartpapier, Hartgewebe und Hartholz haben als Werkstoffe in der Elektrotechnik und im Maschinenbau nur noch eine untergeordnete Bedeutung. Sie wurden durch die in vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Kunststoffe ersetzt.

Preßmassen mit anorganischen Füllstoffen werden wegen ihrer guten Wärmebeständigkeit für Geräte und Schalterteile verwendet, die einer hohen Temperatur,

© Holland + Josenhans

z. B. in Lichtbogennähe, ausgesetzt sind. Sie dienen außerdem als Isolier- und Konstruktionsteile in der Elektronik, in der Nachrichten- und Hochfrequenztechnik sowie beim Antennenbau.

Preßmassen mit organischen Füllstoffen werden häufig nur mit Bakelit bezeichnet. Man stellte u. a. Schalterteile, Deckplatten und Radiogehäuse daraus her.

Hartpapier diente in der Elektrotechnik zur Herstellung von Spulenkörpern, Leiterplatten und Baismaterial, Klemmbrettern, Lötösenleisten, Trennwänden, Grundplatten, Gehäusen u. dgl.

Hartgewebe wird ähnlich Hartpapier verwendet. Im Maschinenbau fertigte man u. a. Bolzen, Lager und Zahnräder (leiser Lauf) aus Hartgewebe.

Hartholz hat eine sehr gute mechanische Festigkeit. Es diente vor allem im Maschinenbau häufig als Konstruktionswerkstoff.

Reines Phenolharz wird als Rohstoff zur Lackherstellung (Isolierlacke, einschließlich Lackierung von Schichtwiderständen; Holzlacke und Kitte), teilweise als Sockelkitt für Rundfunk- und Fernsehröhren sowie als Gießharz verwendet, auch als Trägermaterial für Dehnungsmeßstreifen wird es eingesetzt.

In der Kunstgewerbeindustrie dient dieses sog. Edelkunstharz als Bernsteinersatz. Ferner stellt man Billardkugeln, Messerhefte, Beschläge und Griffe daraus her.

Als Bindemittel findet Phenolharz z. B. Anwendung bei der Herstellung von Hartfaser- und Spanplatten, Schleifscheiben, Kupplungs- und Bremsbelägen.

Gegossene Platten oder Rohre werden als säure- und lösungsmittelbeständige Bauteile verwendet.

7.18 Aminoplaste (MF Melaminharz)

Handelsnamen: Albamit, Bakelit, Geax M, Pollopas, Resopal, Ultrapas (Preßmassen oder Schichtstoffe)

Herstellung

Ausgangsmaterialien zur Herstellung der Aminoplaste sind Harnstoff- oder Melaminharz, sog. Aminoharze.

Harnstoffharz entsteht durch Polykondensation von Harnstoff und Formaldehyd. Melaminharz entsteht durch Polykondensation von Melamin[1] und Formaldehyd. Die Harze werden mit Füllstoffen gemischt und unter Druck, Wärme sowie unter Anwesenheit von Katalysatoren ausgehärtet.

Wie bei den Phenoplasten werden auch bei den Aminoplasten Preßmassen und Schichtpreßstoffe hergestellt.

[1] Aus Kalziumkarbid und Stickstoff stellt man zunächst Kalkstickstoff her. Dieser ergibt mit Wasser und Kohlensäure über verschiedene Umsetzungen Melamin.

© Holland + Josenhans

7.16 Polyimide (SP)

Handelsnamen: Resine, Vespel (Harz, teils auch mit Füllstoff), Kapton (Folie).

Herstellung

Polyimide entstehen durch Polykondensation von vierbasischen aromatischen Säuren[1] mit aromatischem Diamin[2].

Eigenschaften

Die nachfolgend angegebenen Eigenschaften beziehen sich auf Polyimidfolie. Die Angaben in Klammern gelten für Polyimidharze, diese Eigenschaften sind von den verwendeten Füllstoffen (u. a. Grafit, Molybdänsulfid, Glasfasern oder PTFE) mit Anteilen zwischen 10 % und 40 % abhängig.

Dichte:	1,7 g/cm³ (1,4...1,5 g/cm³)
Spezifischer Widerstand:	$10^{18}\ \Omega \cdot$ cm ($10^{16}\ \Omega \cdot$ cm)
Durchschlagsfestigkeit:	280 kV/mm (10...50 kV/mm)
Dauertemperatur:	–250 °C...+400 °C (300 °C)
Zugfestigkeit:	etwa 180 N/mm² (100 N/mm²)
Dehnung:	70 % (5...10 %)

$\varepsilon = 3$ (3...7)
$\tan \delta = 3 \cdot 10^{-3}$ ($5 \cdot 10^{-3}$)

Polyimide sind Duroplaste, sie haben keinen Schmelzpunkt, bei 800 °C beginnen sie zu verkohlen, sie sind nicht entflammbar.

Polyimidfolie ist durchsichtig, goldfarben und praktisch porenfrei. Polyimidfolie kann mit Polyesterfolie verglichen werden, hat jedoch bei relativ hohen Temperaturen noch sehr gute Isolationseigenschaften.

Die Folie kann sehr leicht metallisiert oder laminiert werden. Sehr häufig trägt Polyimidfolie einseitig oder beidseitig eine Deckschicht aus PTFE. Die maximal zulässige Temperatur wird bei laminierten Folien von dem aufgetragenen Werkstoff bestimmt.

Polyimide nehmen nur sehr wenig Feuchtigkeit auf und werden von Lösungsmitteln und Ölen nicht angegriffen, auch bei radioaktiver Bestrahlung sind sie beständig.

Verbindungen werden durch Kleben hergestellt.

Polyimidharze sind warmhärtend und werden mit oder ohne Füllstoff in Pressen bei etwa 250 °C und einem Druck von etwa 2000 N/cm² verarbeitet. Die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Harze sind schlechter als die der Folien, die Eigenschaften sind stark vom verwendeten Füllstoff abhängig.

[1] Aromatische Säuren bestehen im Einzelmolekül aus einer Kohlenwasserstoffverbindung (Bezeichnung R) und einer sog. Karboxylgruppe COOH. Für das Molekül einer aromatischen Säure gilt: R-COOH.

[2] Aromatisches Diamin besteht im Einzelmolekül aus einer Kohlenwasserstoffverbindung (R) und 2 Aminogruppen (NH_2). Für das Molekül des aromatischen Diamins gilt: $R\text{-}(NH_2)_2$.

© Holland + Josenhans

Verwendung

Folien aus Polyimid werden als hochtemperaturbeständiges Draht-, Kabel-, Motorennut- und Windungsisolationsmaterial, zur Spulenbeschichtung, als Dielektrikum in Kondensatoren, für biegsame gedruckte Schaltungen (Basismaterial), Magnetbänder, Klebestreifen, Schläuche u. dgl. verwendet. Wegen der sehr hohen Temperaturbeständigkeit der Polyimidfolien können damit isolierte Wicklungen sehr kompakt gebaut werden.

Polyimidharze werden als Grundsubstanz bei verschiedenen Isolier- oder Tränklacken verwendet und dienen außerdem als Bindemittel bei Bremsbelägen und Schleifscheiben. Mit oder ohne Füllstoff werden die Harze als Fertigteile oder noch spanabhebend bearbeitbare Halbfabrikate in verschiedenen Industriezweigen, u. a. Lagerwerkstoffe und Dichtungen, einschließlich der Elektroindustrie verwendet.

Die **Polyesterimide** sind den Polyimiden chemisch sehr ähnlich und dienen u. a. zur Herstellung von Lacken.

7.17 Phenoplaste (PF Phenolharz)

Handelsnamen: Alberit, Bakelit, Dellit, Fluosit, Resart, Resinol, Supraplast, Trolitan, Urbanit (Preßmassen)
Canevasit, Durafol, Lignofol, (Hartholz, auch Schichtholz genannt)
Harex, Linax, Novotex, Resitex, Ruwatex (Hartgewebe)
Birax, Ferrozell, Geax P, Pertinax, Ruwazell, Trolitax (Hartpapier)
Glasotex (Füllstoff Glasfasern)

Herstellung

Aus Phenolen[1] oder Kresolen[2] und Formaldehyd entsteht durch Polykondensation unter Anwesenheit von Katalysatoren, z. B. Säuren oder Laugen, Phenolharz. Dieses Harz ist noch schmelzbar. Erst durch Zugabe von sog. „Härtern", durch Wärme oder durch Wärme und Druck findet eine weitere Molekülvernetzung statt. Das Harz härtet aus – Duroplast.

Vor der Aushärtung wird das Harz mit organischen oder anorganischen Füllstoffen gemischt.

Organische Füllstoffe sind z. B. Holzmehl, Zellulose, Papier und Textilien.

Anorganische Füllstoffe sind z. B. Gesteinsmehl, Glasfasern, Mikroglaskugeln oder Glasmehl, Schiefermehl, Kreide, Quarz und Talkum.

[1] Phenole können zwei oder drei reaktionsfähige Stellen, H-Atome, haben – Vernetzungen.
[2] Kresole sind ähnlich wie Phenole Kohlenwasserstoffverbindungen und werden aus Teer gewonnen.

© Holland + Josenhans

Außerdem stellt man daraus schlagfeste Gehäuse, z. B. Handbohrmaschinen, Verteilerkästen, Kleinmotoren, Haushaltsgeräte und Starkstromkupplungen, Schutzhelme (Verstärkung mit Glasfasern), Spulenträger, Skalenscheiben und Schrauben her. Überzüge auf Metallen (z. B. Nylonpulver elektrostatisch oder durch Wirbelsintern aufgebracht) dienen als Korrosionsschutz. Überzüge auf Kunstleder verleihen diesem eine hohe Abriebfestigkeit.

Weitere Verwendung finden die Kunststoffe u. a. als Teile in der Sanitärtechnik (Griffe, Handräder, Wasserhähne, Brausen), als Beschläge in der Bau- und Möbelindustrie, als Textilien (Kunstseide), Angelschnüre, Borsten, Rohre und Schläuche sowie für Kämme, Füllhalterteile, Reißverschlüsse und im Maschinenbau als geräuscharme und schwingungsdämpfende Zahnräder und Lager, Kugellagerkäfige, als Schrauben, Muttern, Dübel, Spielzeug, Teile von Skibindungen, Dichtungen sowie als die verschiedensten größeren und kleineren Konstruktionsteile einschließlich Verkleidungen.

Polyamide und lineare Polyurethane kommen ferner als Lackrohstoffe zur Anwendung.

Die Kunststoffkombination Poly-amid-imid (Torlon) ist bis 260 °C verwendbar und wird eingesetzt, wo hohe Festigkeit und hohe Lebensdauer unter erhöhtem Temperatur- und Chemikalieneinfluß gefordert wird. Sie ist gammastrahlenbeständig und wird auch als Gleitlager (ungeschmiert) und Dichtungsmaterial verwendet.

7.15 Vernetzte Polyurethane (PUR)

Handelsnamen: Adiprene, Desmodur, Desmophen, Moltopren, Ondex, Protolin, Vulkollan
Baygal, Baymidur, Blendur (Harze)

Herstellung

Durch Polyaddition von dreiwertigen Alkoholen[1] und Isocyanaten[2] entstehen die vernetzten Polyurethane.

Läßt man die Ausgangsmaterialien mit Wasser und Katalysatoren reagieren, so spaltet sich Kohlensäure ab, die den Werkstoff auftreibt – Schaumstoff.

Verwendet man zur Reaktion nur einen „Vernetzer", so bildet sich ein fester Stoff – Vollstoff.

Vernetzte Polyurethane werden vor Abschluß der Reaktion meist durch Gießen geformt.

[1] Durch die Dreiwertigkeit, d. h. drei reaktionsfähige Stellen, sind Vernetzungen möglich. Ein dreiwertiger Alkohol ist z. B. Glyzerin.
[2] Isocyanat: – N = C = O.

© Holland + Josenhans

Eigenschaften

Dichte:	0,02...0,8 g/cm³
Zulässige Temperatur:	etwa 100 °C, Harze bis 220 °C
Zugfestigkeit:	etwa 35 N/mm² (Vulkollan), etwa 60 N/mm² (Harze)
Durchschlagsfestigkeit:	> 25 kV/mm

$\varepsilon = < 5$

Vernetzte Polyurethane sind Duroplaste.

Durch das Mischungsverhältnis der Ausgangsmaterialien kann man den Grad der Vernetzung und damit die Elastizität beeinflussen. Desgleichen ist die Herstellung von grob- oder feinporigen bzw. elastischen, starren oder harten Schaumstoffen möglich.

Vernetzte Polyurethane sind benzin- und ölbeständig. Säuren und Laugen sowie kochendes Wasser greifen an.

Die mechanische Bearbeitung der vernetzten Polyurethane ist schwierig. Verbindungen werden durch Kleben hergestellt. Der Werkstoff ist sehr verschleiß- und abriebfest, elektrisch gut isolierend und besitzt eine sehr lange Lebensdauer.

Polyurethanharze werden als 2-Komponenten-System mit einer variablen Topfzeit < 1 Stunde bis 10 Stunden und als 1-Komponenten-System, das unter Wärmezufuhr aushärtet, geliefert.

Vernetzte Polyurethane brennen mit gelblicher Flamme und stechendem Geruch.

Verwendung

In der Elektrotechnik werden vernetzte Polyurethane außer als Lackrohstoff nicht verwendet.

Schaumstoffe dienen u. a. als Schwämme, Polster, Schallisolatoren und zum Ausschäumen von Bauteilen in Sandwichtechnik wie Bootsteile und Dachelemente.

Aus Polyurethanschäumen werden außerdem wetterfeste Antennenverkleidungen und aus sog. Schaumsystemen wartungsfreie und maßgenaue Schwellen im U-Bahnbereich hergestellt. Mit Grafit oder Ruß gefüllte, speziell geformte Polyurethan-Weichschaumplatten werden als Absorber zur Auskleidung von reflexionsarmen Mikrowellen-Meßräumen verwendet.

Vollstoffe finden als Dichtungen, Manschetten, Reibräder, Vollreifen bei Elektrokarren und als elastische Konstruktionselemente im Maschinen- und Fahrzeugbau Verwendung.

Polyurethanharze werden zur Imprägnierung und zum Tränken von Spulen einschließlich Motorwicklungen verwendet, teilweise mit Zusätzen von mineralischen Füllstoffen (Kreide, Dolomit, Quarz). Mit PUR-Harz imprägnierte, getränkte Faserfüllstoffe dienen zur Herstellung von Leiterplatten, Prepregs oder Formteilen, u. a. Rohre. Kohlebürsten für elektrische Maschinen sind oft als Harzmatrix aus PUR-Harzen hergestellt.

© Holland + Josenhans