



www.EPOTEK.com

Guide d'application pour les époxyes

FTPOLYMER



!EPOXY.
* TECHNOLOGY

Ce guide est un outil pédagogique conçu pour aider les utilisateurs de colle à acquérir une compréhension plus approfondie des adhésifs par des tests définissant ses propriétés. Ce guide est la résultante des efforts combinés de plusieurs départements d'Epoxy Technology, Inc. notamment: la Qualité, la recherche et le développement, le service technique, le service des formulations spécifiques, la fabrication et les services des ventes et du marketing.

Bien que nous ayons fondé notre guide sur les plus récentes données et tests disponibles, les progrès des méthodes d'essai et des matériaux sont en constante évolution.

Merci d'utiliser cet ouvrage seulement comme un guide général et de suivre dans tous les cas les recommandations répertoriées sur des fiches techniques ainsi que toutes les instructions techniques supplémentaires fournies avec votre produit de collage.

Nous espérons que les informations contenues dans ce guide vous seront utiles dans le choix du meilleur adhésif pour votre application.

Pour toutes assistances supplémentaires nécessaires, merci de contactez nos experts applications chez FT Polymer, service.clients@ftpolymer.fr ; Tél : 01 39 13 20 82.

FTPOLYMER

Sommaire

1.0 Viscosité / Rhéologie	4
2.0 Durée de vie et la vie de travail	8
3.0 Durcissement de l'adhésif	11
3.1 Cinétique de Cuisson	13
3.2 Température de transition vitreuse (Tg)	18
4.0 Analyse thermogravimétrique (TGA)	22
4.1 Température de dégradation	23
4.2 Méthode de dégazage (stabilité thermique)	24
5.0 Force de cisaillement	26
5.1 Force de cisaillement «Lap shear»	26
5.2 Force de cisaillement «Die shear»	28
6.0 Analyse mécanique dynamique (DMA)	29
7.0 Analyse thermomécanique (TMA)	41
8.0 La conductivité électrique (Volume de résistivité-VR)	44
9.0 Conductivité thermique	47

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

1.0 – Viscosité / Rhéologie

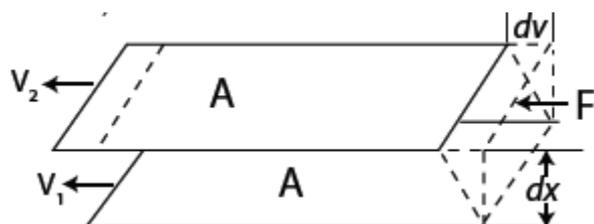
La viscosité est un terme et une valeur utilisée pour décrire le frottement interne d'un fluide. Le degré de frottement est observé lorsqu'une force est appliquée au matériau. Plus il y a de friction détectée, plus il est nécessaire d'appliquer une force pour déplacer le matériau ou pour le "cisailer". Le cisaillement se produit lorsque le fluide est effectivement déplacé. Une faible viscosité de produit comme l'eau nécessite moins de force que l'écoulement d'un matériau à forte viscosité, comme le beurre d'arachide. La force nécessaire pour cisailer un matériau peut être mesurée et reproduite en utilisant un viscosimètre ex: Brookfield®. Un type de viscosimètre cône/plan est présenté sur la figure 1.

Le viscosimètre à cône/plan, mesure précisément le couple mis en place par la résistance d'un fluide, en sandwich entre un cône rotatif et un plan fixe. Le couple est directement proportionnelle à la contrainte de cisaillement dans le matériau, il peut facilement être converti en centipoises (mPa.) par le biais des constantes géométriques connus du cône, de la vitesse de rotation, et de la contrainte du couple lié (ou à partir de diagrammes de gamme précalculées). La partie appelée plan est la coupelle d'échantillon (représenté dans la figure 1) qui maintient le fluide et reste stationnaire. Elle est à double enveloppe de telle sorte que la température constante est maintenue tout au long du test. La coupelle est verrouillée sur le viscosimètre de sorte que le matériau vienne en contact avec le cône.



Newton définit la viscosité par le modèle de la figure 2 ci-dessous. Deux plans parallèles de fluide de superficie égale "A" sont séparés par une distance "dx", se déplaçant dans la même direction, mais à des vitesses différentes (V1 et V2). Il suppose que la force nécessaire à maintenir cette différence de vitesse est proportionnelle à la différence de la vitesse dans le liquide. Aussi appelé le gradient de vitesse. Pour exprimer cela, Newton a déclaré que "η" est une constante pour un matériau donné et qui est appelé "viscosité." Le gradient de vitesse, dv / dx , est une mesure de la variation de vitesse où les deux couches se déplacent l'une par rapport à l'autre. Cette description explique le cisaillement d'un liquide passant à travers et est dénommé "contrainte de cisaillement (S)" qui est rapporté dans la deuxième réciproque» (sec-1). Le terme F / A indique la force par unité de surface nécessaire pour produire l'action de cisaillement. Elle est dénommée «vitesse de cisaillement » et sera symbolisée par " F ". Son unité de mesure est" dynes par centimètre carré "(dynes/cm²).

FTPOLYMER



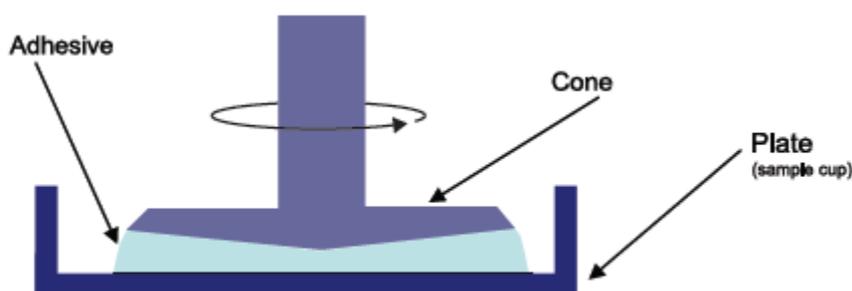
L'utilisation de ces termes simplifiés, la viscosité peut être définie mathématiquement par cette formule:

$$\eta = \text{viscosité} = F / S = \text{contrainte de cisaillement} / \text{taux de cisaillement}$$

La méthode d'essai ASTM D2393, "Méthode d'essai standard pour les matériaux à haut cisaillement utilisant un viscosimètre de type cône/plan" est basée sur la définition ci-dessus et est suivie pour les mesures de viscosité.

L'unité fondamentale de la viscosité est la poise est l'unité CGS de viscosité dynamique, de symbole P ou Po. Définie comme la viscosité d'un fluide pour lequel une contrainte tangentielle d'une dyne par cm² permet de maintenir une vitesse de 1 cm/s entre deux plans parallèles séparés par 1 cm de ce liquide, une poise vaut une dyne-seconde par centimètre carré ou un dixième de poiseuille (c'est-à-dire 0,1 Pa·s). En d'autres termes, le double de la force déplace le fluide deux fois plus vite. Ceci est vrai pour les fluides newtoniens seulement. La poise est souvent utilisée avec le préfixe centi, pour donner la centipoise, de symbole cP : 1 cP = 1 mPa·s. La viscosité de l'eau à 20 °C est ainsi d'une centipoise.

Ce qui suit est une vue schématique (figure 3) d'un viscosimètre cône/plan en action :



Le type de flux décrit ci-dessus est vrai pour les fluides newtoniens seulement. Les graphiques suivants montrent comment ce type de produit se comporte. La figure 4 montre la relation linéaire entre la vitesse de cisaillement (F) et la contrainte de cisaillement (S). La figure 5 montre comment la viscosité reste constante (en supposant que la température est maintenue constante) avec différentes vitesses de cisaillement.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

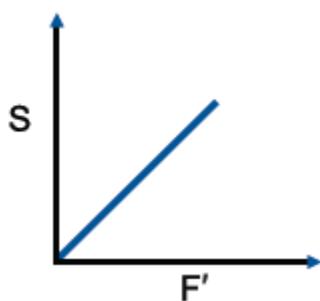


figure 4

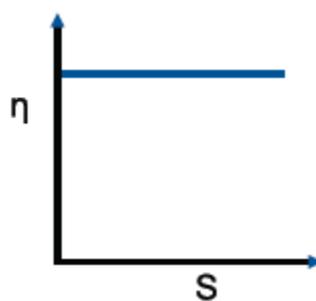


figure 5

Mais tous les fluides ne sont pas Newtonien dans leurs caractéristiques de débit. En fait, il existe plusieurs types de comportement de l'écoulement. Ces produits sont classés comme non-Newtonien. Il y a trois sous-groupes au sein de la classification non-Newtonien : les pseudoplastiques, les dilatants et les plastiques.

Fluide rhéofluidifiant ou pseudoplastique diminuent de viscosité lors d'une augmentation de la vitesse de cisaillement. Les figures 6 et 7 représentent celle-ci :

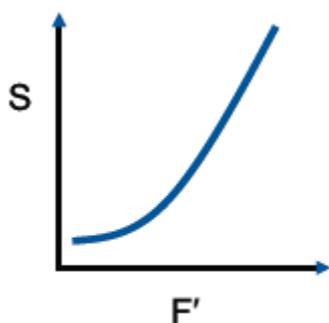


figure 6

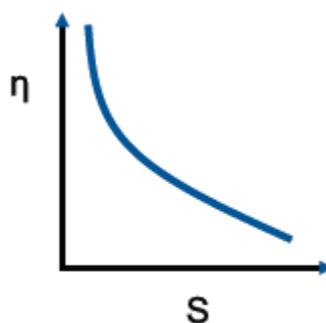


figure 7

Les fluides rhéoépaississant ou dilatants comme on le voit dans les figures 8 et 9 sont des produits dont la viscosité augmente lorsque la vitesse de cisaillement augmente. Ils sont également appelés épaississant et sont généralement considéré comme des solides non floculés tels que l'argile.

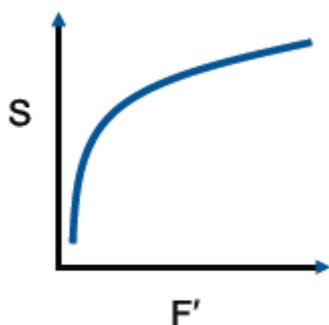


figure 8

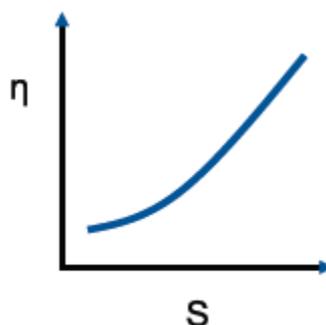


figure 9

FTPOLYMER

Le troisième et dernier type d'écoulement est le plastique. Quand un matériau présente un comportement plastique similaire aux schémas 10 et 11 ci-dessous, il restera dans un état solide jusqu'à ce qu'une certaine quantité de force soit appliquée avant qu'il ne s'écoule. Le meilleur exemple est celui du ketchup.

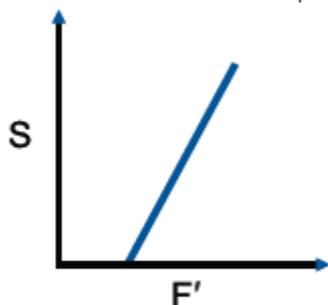


figure 10

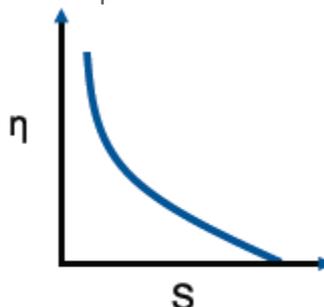


figure 11

Les résines époxydes peuvent présenter tout ou partie de ces comportements d'écoulement ce qui est important à considérer lors du choix de l'adhésif pour une application spécifique.

La thixotropie est un autre paramètre qui est liée à la viscosité et peut être mesurée à l'aide d'un viscosimètre. Un fluide thixotrope diminue sa viscosité avec le temps, tandis qu'il est soumis à un cisaillement constant comme le montre la figure 12. Ce type de comportement peut se produire en combinaison avec l'un des types d'écoulement ci-dessus.

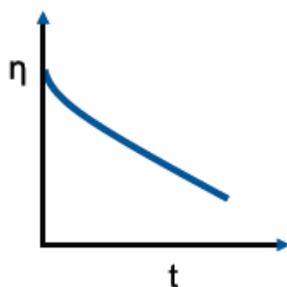


figure 12

Quand on parle de thixotropie, souvent nous nous référons à l'index thixotropique (TI). Il s'agit d'une valeur défini en prenant le rapport de deux lectures distinctes à des vitesses différentes sur un viscosimètre. Par exemple, si un matériau produit une lecture de 15.000 cps à 1 tour/minute (RPM) et 10.000 cps à 10 tours/minute, l'indice thixotropique est égal à 15000/10000 soit 1,5.

Habituellement, le TI est calculé à partir de viscosités mesurées en RPM qui ont un facteur de 10 comme intervalle (soit entre 1 et 10 RPM ou entre 10 et 100 RPM). Ce nombre est également un élément clé dans le choix du bon type de matériel pour une technique particulière de dépose.

Tout ce qui précède la terminologie et les définitions sont également appelés "paramètres rhéologiques". La rhéologie est définie comme la science de la déformation et l'écoulement des matériaux. Le comportement de l'écoulement est important dans de nombreux procédés industriels et le succès ou l'échec d'une application est largement basé sur ces propriétés pour un adhésif spécifique. Revêtements, plastiques moulés, colles, les soins cosmétiques, crèmes de soins, encres, ciment, pâtes à braser et les médicaments sont des exemples de gamme de produits disponibles dans le commerce dont la viabilité dépend de la présence d'une rhéologie appropriée.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Pour tous les matériaux ci-dessous, les propriétés rhéologiques nécessaires doivent être examinées avant leur fabrication et leur utilisation.

Le graphique suivant (figure 13) montre comment un utilisateur peut équilibrer la viscosité et la thixotropie afin de déterminer la meilleure méthode pour une colle donnée :

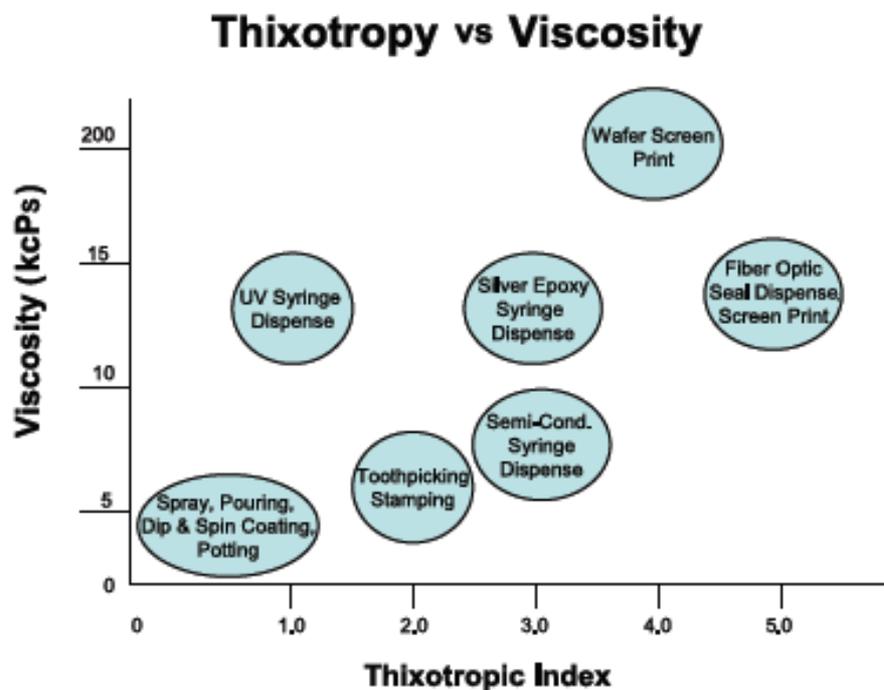


figure 13

2.0 – Durée de vie et la vie de travail

Le « pot life » est une mesure utilisée pour définir la durée pendant laquelle un matériau peut être traité avant que sa viscosité change sensiblement. En règle générale, le pot life est défini comme la durée nécessaire au doublement de la viscosité initiale.

Figure 1 ci-dessous montre l'augmentation de la viscosité dans le temps pour un système de polymérisation à température ambiante standard typique d'une époxy. Vous remarquerez que la viscosité augmente lentement avant que la réaction chimique commence. Cependant, dès que la réaction démarre, la chaleur dégagée, à son tour, augmente la vitesse de réaction. Ce processus entraîne l'augmentation de la viscosité d'une manière exponentielle.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr



figure 1

Comme le montre la figure 2, ce matériau possède environ 3 heures de vie en pot, c'est à dire qu'il faut trois heures de temps avant que la viscosité double (100% de variation).

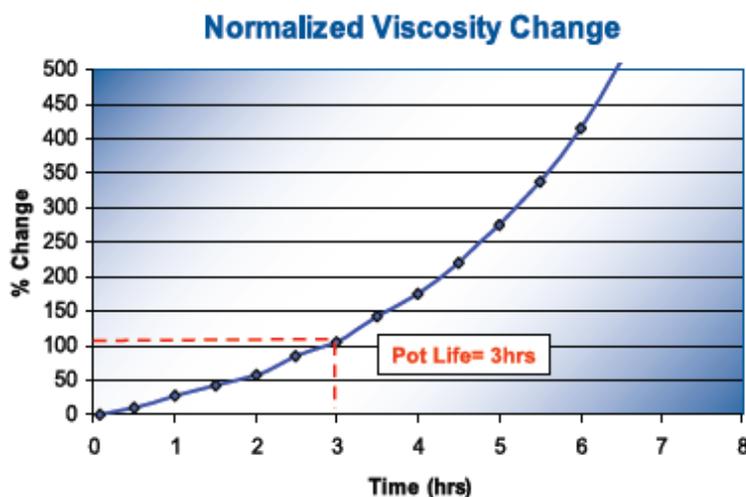


figure 2

Souvent, la connaissance du pot life seul, ne suffit pas à déterminer combien de temps un matériau donné peut être utilisée pour un procédé de fabrication donné. Par exemple, la figure 3 montre la viscosité normalisée (% changement) en fonction du temps pour deux des produits différents. Les deux produits bleus et verts présentent le même pourcentage de changement de viscosité en fonction du temps. Les deux formulations doublent leur viscosité après 3 heures (représenté par une variation de 100%), elles auraient donc toutes les deux 3 heures de pot life.

Comme le montre la figure 2, ces matériaux possèdent environ 3 heures de pot life, c'est à dire qu'il faut trois heures avant que la viscosité double (100% de variation).

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Cependant, comme la figure 4 montre, les deux matériaux ont des valeurs de viscosité de départ très différentes. La viscosité de départ du matériau vert est dix fois plus grande à celle de la matière bleue. En conséquence, l'ampleur de la variation de la viscosité sur une période de temps donnée pour le produit vert est beaucoup plus élevée que le produit bleu. Dans ces cas, les limites du processus pour une application spécifique doit être utilisée pour définir le temps de travail pour un matériau donné dans un procédé donné.

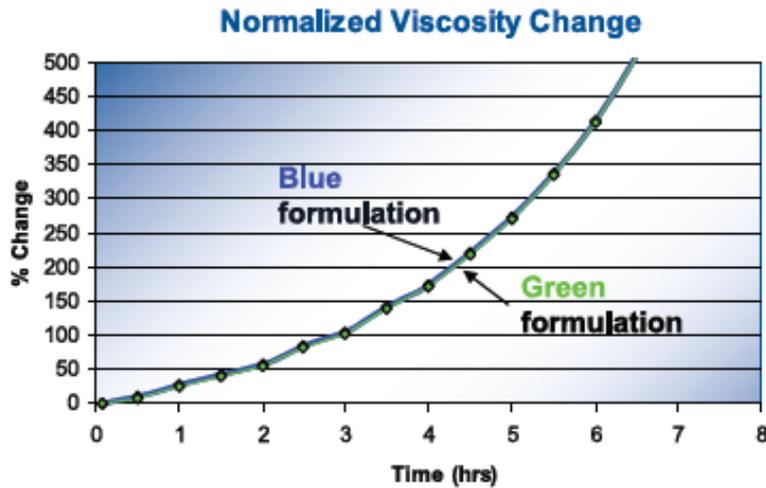


figure 3

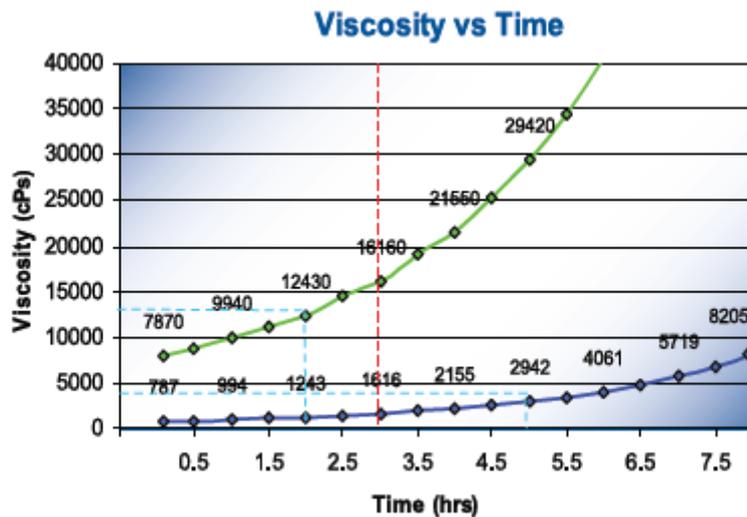


figure 4

Dans l'exemple ci-dessus, le client A peut être en mesure de travailler avec le produit bleu à condition que la viscosité soit inférieure à 3000 cPs. Cela donnerait au client A 5 heures de durée de vie possible (2 heures de plus que le pot life). D'autre part, le client B ne peut être en mesure de travailler avec la matière verte si la viscosité est moins de 12500 cP. Dans ce cas, le matériau aurait une durée de travail (work time) de seulement 2 heures dans le processus du client B (1 heure de moins que le pot life)

Ainsi, la vie en pot (pot life) est une valeur de fiche technique conçu pour donner une première description de la vitesse d'augmentation de viscosité dans le temps. Cependant, le travail effectif (work time) du produit sera une donnée spécifique et doit être déterminée et définie sur la base d'un processus individuel.

3.0 – Durcissement de l'adhésif

Le terme polymère vient du grec plus mots (ce qui signifie plusieurs) et méros (ce qui signifie parties). En tant que tel, les polymères sont de longues chaînes de molécules composées de plusieurs milliers de petites unités (monomères) jointes bout à bout. Un exemple de polyéthylène linéaire, le polymère d'hydrocarbure simple, est montré dans la figure 1 :

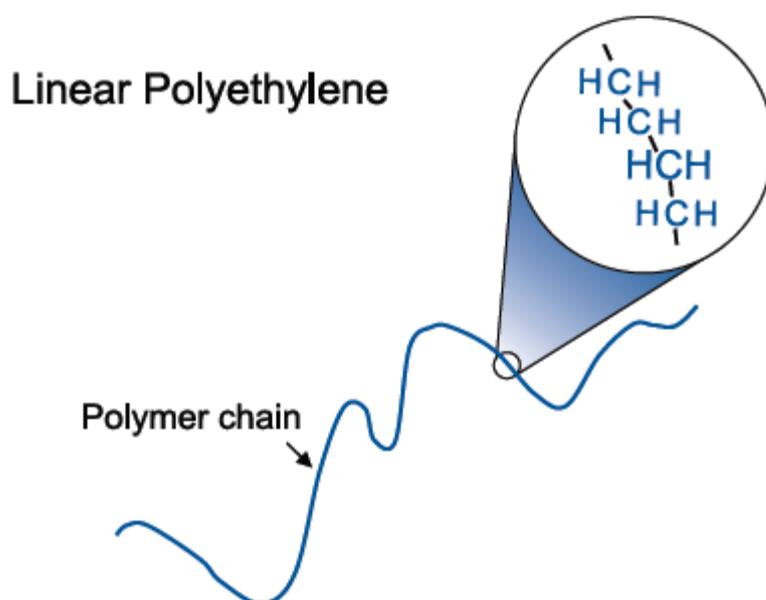


figure 1

Les Polymères se répartissent en deux catégories principales : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

Les matériaux thermoplastiques sont généralement composés de chaînes de polymères linéaires avec peu ou pas de ramifications ou de groupes latéraux - semblable à la matière thermoplastique polymère de polyéthylène dans le diagramme ci-dessus. En conséquence, ces chaînes sont en mesure de facilement glisser les unes sur les autres lorsque l'ensemble est chauffé. De cette façon, les thermoplastiques peuvent être chauffés et formés, puis re-chauffés et re-formés de façon répétée sans dommage.

En revanche, les résines thermodurcissables subissent une réaction chimique lors de la première chauffe et durcissent pour former un réseau tridimensionnel réticulé. Une fois que ces matériaux sont polymérisés, la structure est verrouillée en place et le matériau ne peut plus être reformé ou retraité. Un exemple de la réticulation chimique d'une structure pour un type commun de polymère thermodurcissable est la résine époxy représentée en figure 2.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Example Of Thermoset Cross-Linking Reaction

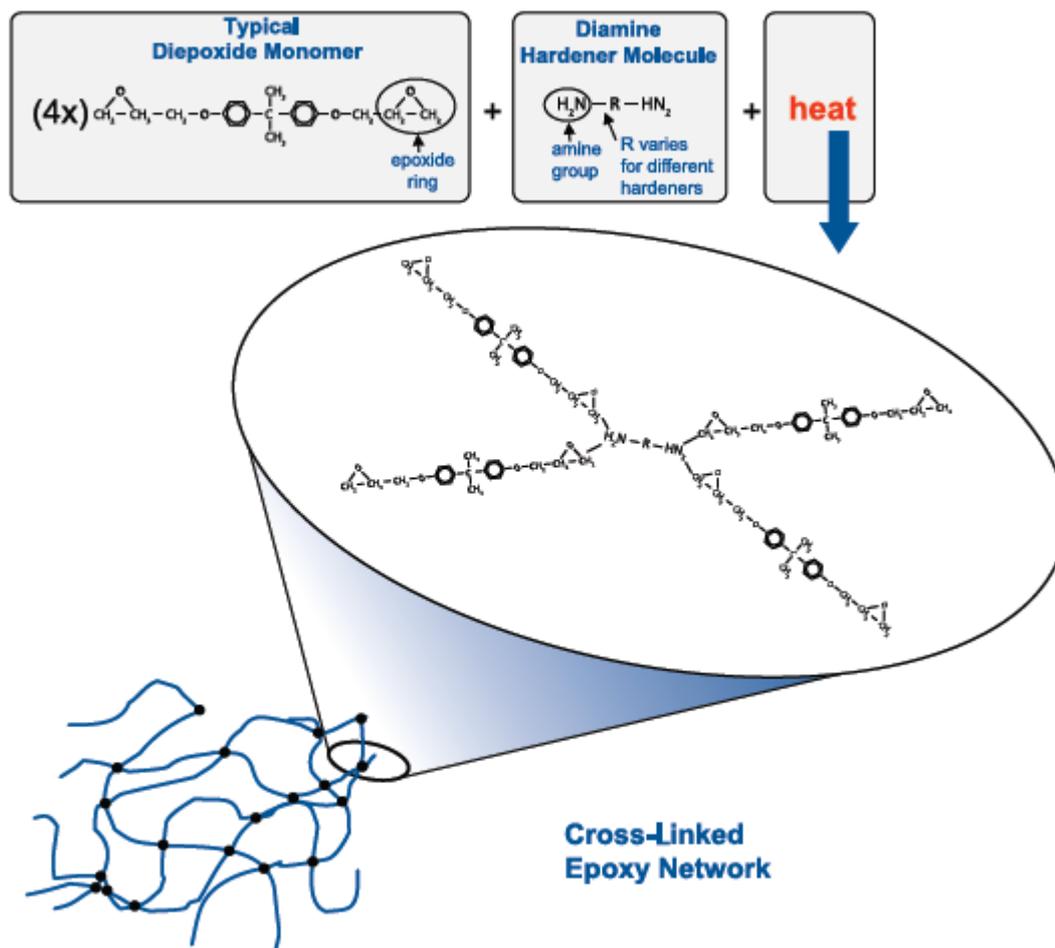


figure 2

Les résines époxydes tirent leur nom des trois chaînons "époxydes toriques situées sur le monomère époxyde de départ. Dans le cas ci-dessus, le monomère de départ est effectivement un diépoxyde, qui contient deux groupes époxydes : un à chaque extrémité du monomère. Le durcisseur dans le système ci-dessus est une diamine, qui contient un groupe aminé réactif aux deux extrémités de la molécule. Chacun des anneaux époxydes peut être ouvert par un hydrogène actif sur la fin de la diamine et produire des liaisons chimiques entre le monomère époxyde et le durcisseur. Ce durcisseur diamine particulier fournit quatre atomes d'hydrogène actifs qui sont capables de réagir avec quatre monomères différents pour lier l'ensemble chimiquement.

En règle générale, plus la fonctionnalité (nombre de groupes aminé réactifs) de l'agent durcisseur est importante, plus les liaisons moléculaires seront étroitement entrelacées pour donner un système thermodurcissable. En général, un système composé de très nombreuses liaisons donne un polymère plus dur et plus résistant à la chaleur, à l'agression chimique et à l'humidité.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

3.1 Cinétique de Cuisson

Le taux de cuisson cinétique pour les adhésifs thermodurcissables peut être contrôlé à l'aide de la calorimétrie différentielle à balayage (DSC). La DSC mesure l'absorption d'énergie d'un échantillon que l'on soumet à un profil thermique spécifique. La quantité de chaleur contenue dans un matériau à un moment donné est connue sous le nom d'enthalpie. Comme de l'énergie thermique supplémentaire est fournie à la matière, son enthalpie augmente.

Le niveau de la variation de température résultant de ce matériel sera dicté par sa chaleur spécifique. A une température donnée, la chaleur spécifique est la quantité d'énergie thermique nécessaire pour modifier la température dudit matériau d'une unité. Figure 3 ci-dessous montre la section transversale d'un support typique de DSC pour échantillon.

Une petite quantité de l'échantillon non durcie (\sim 5-10mg de teneur en résine) est placée dans une petite coupelle en aluminium avec couvercle. Un plateau pour échantillon est placé sur le dessus d'un disque individuel chauffant en chrome. Une coupelle vide en aluminium identique est placée sur un second disque de chauffage servant de référence pour l'expérience.

L'énergie thermique est fournie séparément à la coupelle de l'échantillon et à celle de référence pour correspondre exactement à la vitesse de chauffage d'un profil de température prédéterminé. Le taux d'énergie fournie à l'échantillon pour le chauffer à une vitesse contrôlée est proportionnel à la chaleur spécifique de l'échantillon.

La chaleur spécifique d'un matériau évoluera peu avec la température aussi longtemps que ce matériau reste dans le même état physique. Toutefois, lorsque le profil thermique imposé sur un matériau provoque une transition vers un nouvel état, (fusion, décomposition, durcissement, etc...) cela engendre un changement important dans la chaleur spécifique. Le changement rapide de la chaleur spécifique à une transition provoque alors un changement dans la quantité d'énergie nécessaire à l'échantillon afin de maintenir le chauffage souhaité ou le profil de refroidissement.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Standard DSC Cell*

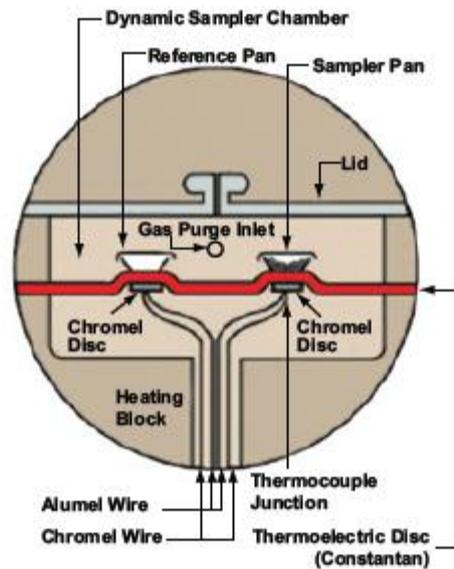


figure 3

*Courtesy of TA Instruments®

Les changements d'état qui absorbent l'énergie sont appelés changements endothermiques.

La fusion est un exemple d'un changement d'état endothermique. La chaleur est mise dans le système afin de permettre aux molécules de commencer à se déplacer. Dans certains cas, une chaleur suffisante mis dans le système pour provoquer l'écoulement global du matériau fondu. À ce point, l'énergie thermique, est converti en énergie cinétique du liquide. D'autre part, les changements d'état qui font évoluer l'énergie sont des transitions exothermiques. La chaleur de réaction (durcissement) et la cristallisation sont des exemples de transitions exothermiques.

La figure 4 montre un certain type endothermique et une transition exothermique comme ils apparaissent dans une analyse DSC.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Typical DSC Transitions

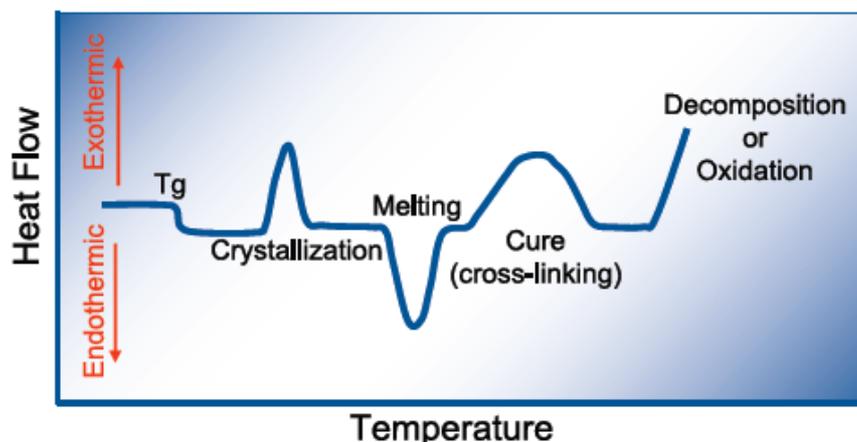


figure 4

Comme mentionné précédemment dans cette section, la DSC peut être utilisée pour surveiller la cuisson d'un matériau thermodurcissable. Ceci est accompli en soumettant un thermodurcissable non cuit à une rampe de température contrôlée et l'analyse de la localisation, la taille et forme du pic d'exothermie.

La figure 5 montre un profil DSC de durcissement cinétique pour un système époxy typique. Le pic de la réponse de l'échantillon au flux de chaleur est situé au-dessus du niveau de référence, représentant un événement exothermique. Le pic de ce durcissement exothermique se situe à environ 150°C, ce qui indique que la cuisson la plus rapide pour ce produit est à cette température. L'apparition du pic de cuisson pour ce produit est située 140°C.

Toutefois, cela ne signifie pas que le produit ne peut pas polymériser en dessous de 140°C. Comme la partie élargie de la courbe cinétique le révèle, il y a effectivement une petite quantité d'exothermie qui commence à une température aussi basse que 80°C. Ce produit particulier peut donc cuire à 80°C, mais il faudra environ quatre heures. En revanche, lorsque ce produit est durci à 150°C, la température du pic d'exothermie, cela ne prendra que 10 minutes environ.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

DSC Kinetic Cure

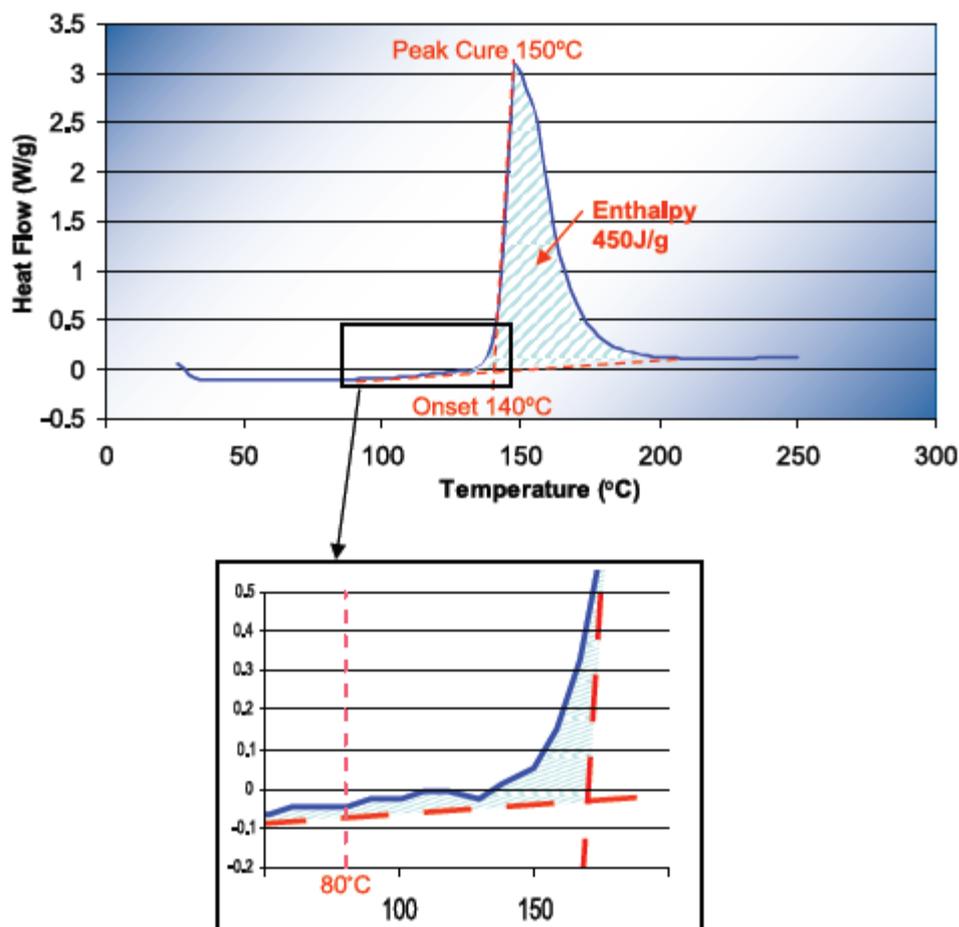


figure 5

La variation totale d'enthalpie que l'échantillon subit pendant le durcissement peut être calculé en intégrant la surface sous le pic exothermique. Pour le matériel en schéma ci-dessus, la chaleur totale de réaction est 450J / g. Comme spécifié dans la norme ASTM D3418, "Méthode d'essai standard pour des températures de transition, les enthalpies de fusion et de cristallisation des polymères par calorimétrie différentielle à balayage", cette chaleur totale de réaction peut ensuite être utilisée pour déterminer l'étendue de la réaction de la matière après qu'elle est durcie selon une condition voulue de durcissement.

Le matériau durci est analysée dans le DSC utilisant le même profil thermique utilisé pour mesurer le matériau non durci. La figure 6 montre l'original de la réaction exothermique matériau non durci ci-dessus, ainsi que celle de la même matière durcie à 150°C pendant 10 minutes.

FTPOLYMER

FTPOLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

DSC to Calculate Residual Cure

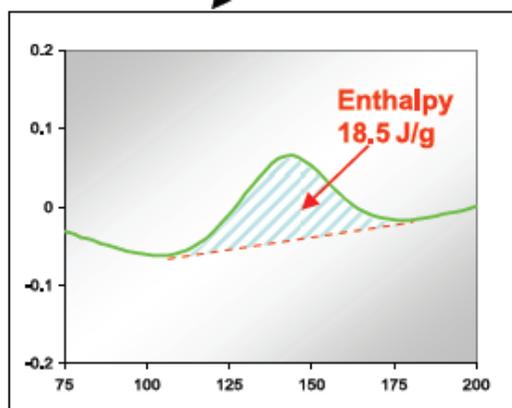
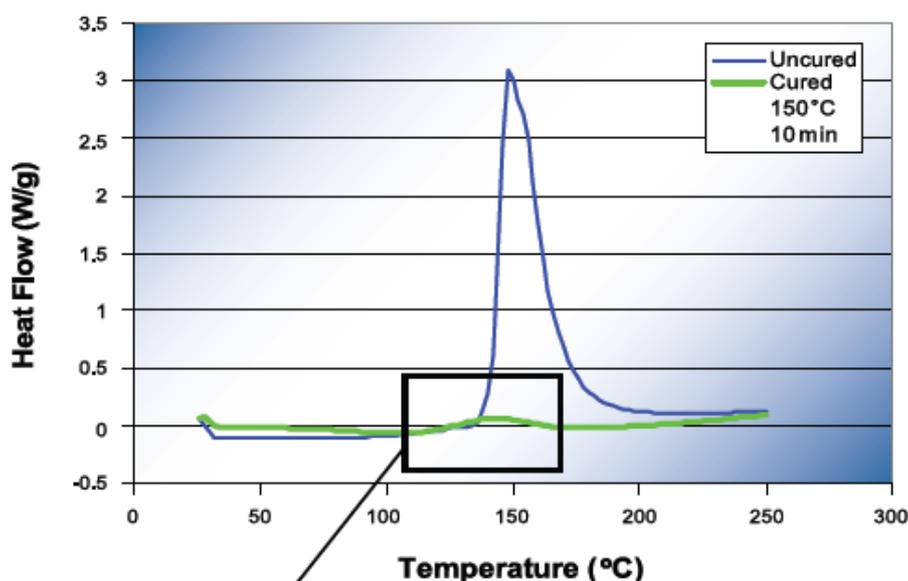


figure 6

Le matériau durci à 150°C pendant 10 minutes présente seulement un très faible pic exothermique résiduel. Ces données permettent d'identifier que la plupart des chaînes moléculaires théoriques se sont construites et se sont liées pendant la cuisson.

La vue agrandie du dégagement de chaleur de l'échantillon durci montre qu'il reste encore 18,5 J / g de l'énergie dégagée contre les 450 d'origine J / g. Ainsi, seulement 4,1% de la matière reste non polymérisée suite à ce profil de cuisson. Les résines époxydes n'ont pas besoin d'obtenir une réaction de 100% dans leur intégralité afin de développer de bonnes caractéristiques en tant que colle. En règle générale, les systèmes qui ont été cuits avec au moins 90% de polymérisation présentent des propriétés mécaniques et physiques qui ne diffèrent pas sensiblement de leur état totalement réagi. En outre, même à un taux inférieur les propriétés obtenues peuvent être suffisantes pour une application donnée.

La DSC peut être utilisée pour la détermination du temps nécessaire pour cuire un matériau particulier à une température donnée afin d'obtenir un degré maximal de cuisson. Ce résultat est obtenu par la mesure du pic de la réaction exothermique d'un matériau à une température constante et dans un temps donné ou sur un balayage thermique.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

La figure 7 montre les différents pics exothermiques pour un produit époxy typique cuite à 80°C, 90°C, 100°C et 110°C. Si le matériau peut durcir en dessous de 80°C, il exige une heure pleine pour atteindre une polymérisation complète à ce niveau de température. Toutefois, s'il est possible d'augmenter la température de cuisson à 110°C, il faudra moins de 15 minutes pour atteindre une polymérisation complète.

Isothermal Cure Profiles

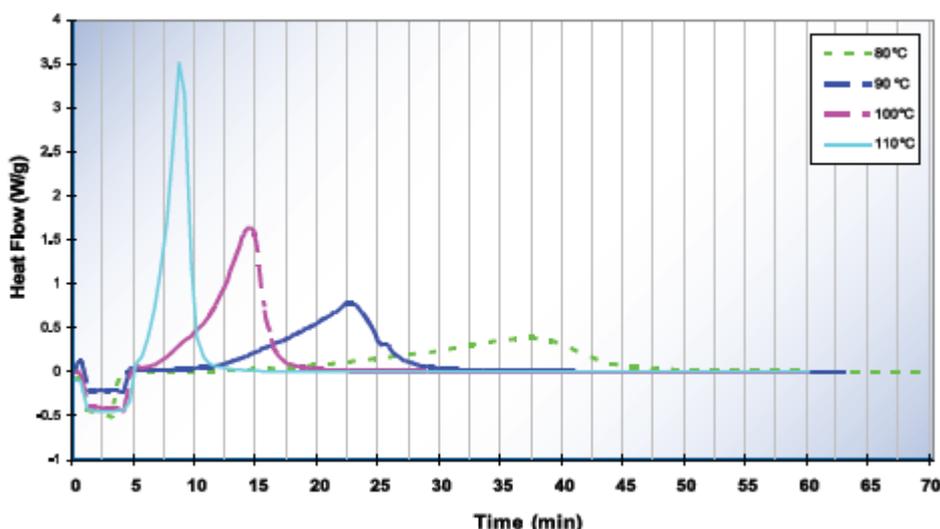


figure 7

Il est à noter que plus un thermodurcissable est polymérisé rapidement, plus le stress communiqué aux pièces est important. En conséquence, il n'est pas toujours souhaitable de cuire rapidement à la plus haute température. Pour certaines applications, il peut être nécessaire d'effectuer une rampe de température aux conditions de cuisson désirée, ou de commencer avec une température plus basse pour « précurer » afin d'obtenir des collages plus souple.

3.2 Température de transition vitreuse (Tg)

Comme nous l'avons vu dans le début de cette section, les liaisons chimiques croisées qui se forment au cours de la cuisson des matériaux thermodurcissables ne permettent pas la refonte du système lorsqu'il est réchauffé. Toutefois, les matériaux réticulés subissent un assouplissement très léger à des températures élevées et à un point connu sous le nom de Température de transition vitreuse (Tg).

La Tg n'est pas une transition thermodynamique ponctuelle, mais est en réalité une plage de température sur laquelle la mobilité des chaînes polymères augmente de manière significative et change le matériau d'un état rigide / vitreux à un état élastomérique.

La plage de température sur laquelle cette transition se déroule est très dépendante de la qualité des liaisons chimiques croisées, de leur niveau d'enchevêtrement, ainsi que du degré de flexibilité des chaînes du polymère.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Les polymères construits avec des chaînes moléculaires courtes et des maillages très denses nécessitent une quantité d'énergie thermique très importante pour rendre les chaînes moléculaires mobiles et donc atteindre le stade élastomérique.

Ces systèmes, comme celui indiquée dans la figure 8b ci-dessous, auront une Tg élevée. D'autre part, les systèmes tel que celui représenté dans la figure 8a, qui ont de longues sections de polymères flexibles entre les liaisons, évolueront vers un état élastomérique à une température significativement plus faible, résultat d'une Tg inférieure.

La Tg est un changement d'état endothermique où de l'énergie thermique doit être fournie à la colle en vue de sa transition vers un état « caoutchouteux ». Cette transition peut également être caractérisée par DSC selon la norme ASTM E1356, «détermination de la température de transition vitreuse par mesure du différentiel de calorimétrie». Les échantillons sont préparés et testés de la même manière que celle utilisée pour mesurer la cinétique de polymérisation, à l'exception faite que l'échantillon est déjà polymérisé. L'échantillon peut soit polymérisé en dehors de la DSC en utilisant un profil de cuisson par un procès spécifique (étuve, tunnel, plaque chauffante, etc...), ou peut être polymérisé dans le DSC lors d'une analyse cinétique ou isotherme précédente.

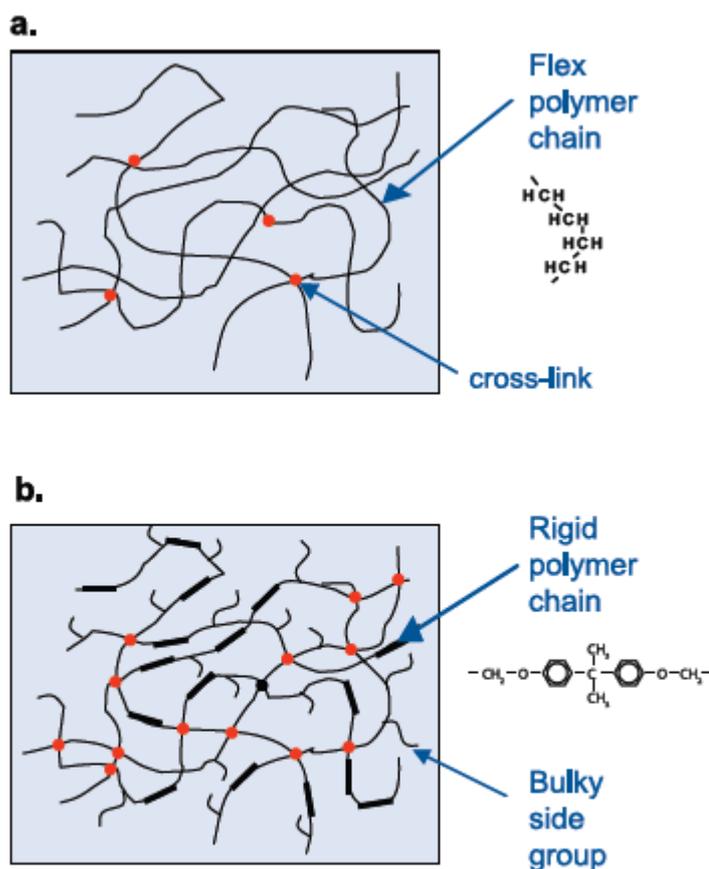


figure 8

Le format d'un balayage Tg est très proche de celui du balayage cinétique. La température est indiquée sur l'abscisse et la réponse du flux de chaleur sur l'ordonnée.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Toutefois, contrairement aux pics exothermiques important qui apparaît lors de la cuisson, la Tg est montrée comme un petit changement d'étape endothermique dans le flux de chaleur.

La figure 9 ci-dessous représente une Tg typique pour une résine époxy. La Tg est en fait une région de transition, plutôt qu'une température spécifique. Dans ce cas, la transition commence autour de 60°C et elle est complète à environ 100°C. Toutefois, l'usage est de reporter une seule valeur de température défini comme le point central de la région de transition tel qu'il est délimité par les tangentes réalisées sur les deux parties plates de la courbe du flux de chaleur. Pour ce matériau, la Tg serait indiquée comme étant de 75°C.

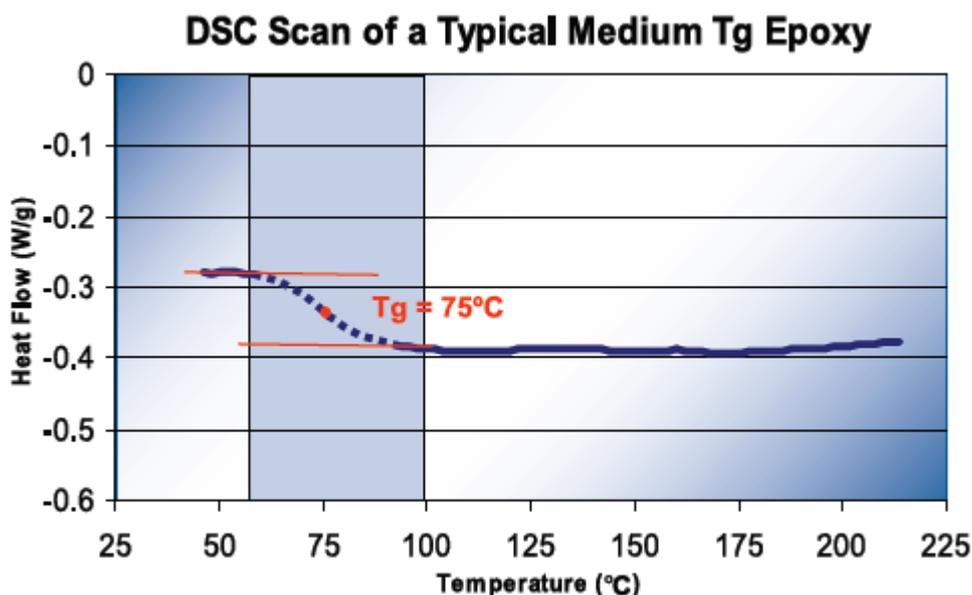


figure 9

La raison pour laquelle la Tg s'étend sur une plage de température plutôt qu'à une température spécifique, est que les chaînes de polymère réticulées prennent le temps d'accroître leur mobilité en réponse à l'énergie thermique appliquée. Au début de l'énergie appliquée, quelques-uns des segments de chaîne, plus flexibles et secondaires au groupe, peuvent commencer à se déplacer. Ce mouvement à petite échelle permet une augmentation du volume libre qui à son tour permet de libérer une partie plus grande avec des segments plus rigides qui pourront commencer à se déplacer une fois que des niveaux d'énergie plus élevés seront appliqués.

Ainsi, même à température constante, la transition vers un état élastomérique prendra un certain temps à évoluer. Toutefois, la Tg d'un matériau est mesurée en le soumettant à une rampe de température type. Le choix de cette dernière dans l'analyse va jouer un rôle important dans la détermination de l'emplacement de la Tg. Plus le balayage est lent et plus la réponse des chaînes de polymères à l'énergie appliquée sera longue. Il en résultera une mesure de la température de Tg plus basse.

En revanche, un balayage très rapide augmentera la température plus rapidement que la réponse des chaînes moléculaires à l'énergie dégagée. La mesure de la température pour la Tg sera augmentée vers des températures plus hautes.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

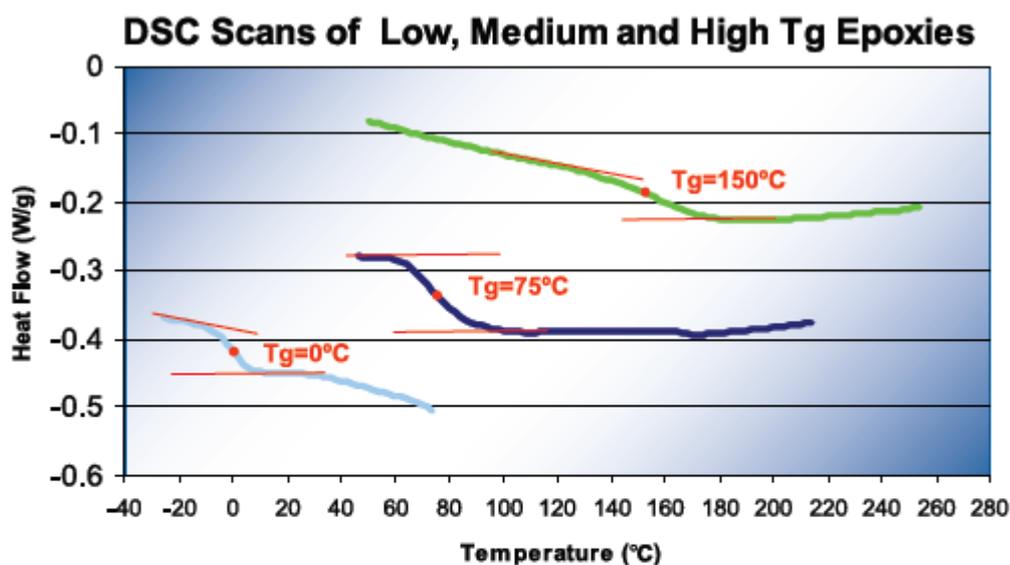
www.ftpolymer.fr

Ainsi, il est très important de vérifier les conditions d'essai concernant la mesure d'une Tg. Des rampes de température de 10°C / min et 20°C / min sont les conditions de test typiques utilisées dans l'industrie. Le 20°C / min est fréquemment utilisé afin de réduire le temps de mesure par deux. Néanmoins, il en ressort une valeur de la Tg plus élevée. La Tg d'un matériau dépendra aussi de son degré de polymérisation. En règle générale, la mesure de la Tg sera basée sur un matériau polymérisé à 100%.

Toutefois, selon le profil de cuisson utilisé pour une application donnée, un moindre degré de polymérisation peut être atteint et, par conséquent, entraînera une Tg inférieure. Une Tg élevée n'est pas forcément nécessaire pour obtenir de bonnes performances pour une colle. Dans de nombreux cas il est effectivement souhaitable que celle-ci fonctionne au-dessus de sa Tg. Puisque le système est chimiquement polymérisé, il ne se dégrade pas au-dessus de la Tg. Il sera simplement dans un état plus souple. Les colles seront utilisées le plus souvent dans des applications exigeants un comportement plus résistant aux chocs thermiques ou mécaniques.

Les colles ayant une Tg haute sont généralement souhaitables pour les applications avec de faibles dilatations dans une gamme de température donnée ou pour une résistance à de très hautes températures.

La figure 10 montre les analyses de Tg pour des époxies à faible, moyenne et haute Tg.



Some Typical Tg Ranges Are:

Very High:	> 200° C
High:	100° C – 150° C
Average:	50° C – 90° C
Low:	< 30° C

figure 10

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

4.0 Analyse thermogravimétrique (TGA)

TGA est un procédé pour mesurer les plus petites variations de poids d'un matériau en fonction de la température. Cette technique est utilisée pour déterminer la température de dégradation. Elle peut également être utilisée pour mesurer la teneur en humidité et le niveau de dégazage. Il est aussi utilisé comme méthode pour vérifier le contenu des charges inorganiques (telles que les paillettes d'argent) dans des formulations pour l'acceptation des lots selon la norme QC ASTM D3850, «Méthode de mesure par la dégradation thermique rapide d'un matériau solide isolant électrique par thermogravimétrie (TGA)

Comme le montre le schéma de la figure 1, la TGA utilise une balance de très grande précision en atmosphère contrôlée. Un panier échantillon est suspendu à un bras d'un côté et équilibré de l'autre par une tare.

Le système est conçu pour compenser les variations de poids de l'échantillon et maintenir ainsi une position équilibrée.

Quand un échantillon est chauffé, il commencera normalement à perdre de la masse à basse température ce qui correspond généralement à l'évaporation soit de l'humidité ou à un faible poids moléculaire, tandis qu'à des températures plus élevées, les pertes de poids plus importantes sont dues à la dégradation final du produit. La perte de masse entraîne une légère remontée du bras de balance coté échantillon. Une LED infra rouge est montée sur le milieu du bras de la balance. Lorsque la position de la balance se modifie et décentre la LED, un capteur IR mesure la différence d'intensité.

Le courant est ensuite fourni à un compteur qui rétablit la position de la balance jusqu'à ce que la lumière provenant de la LED soit de nouveau centrée sur la photo détecteur. La quantité de courant nécessaire pour retourner à la position zéro est directement proportionnelle au déplacement du support échantillon et, par conséquent, du changement de masse de ce dernier.

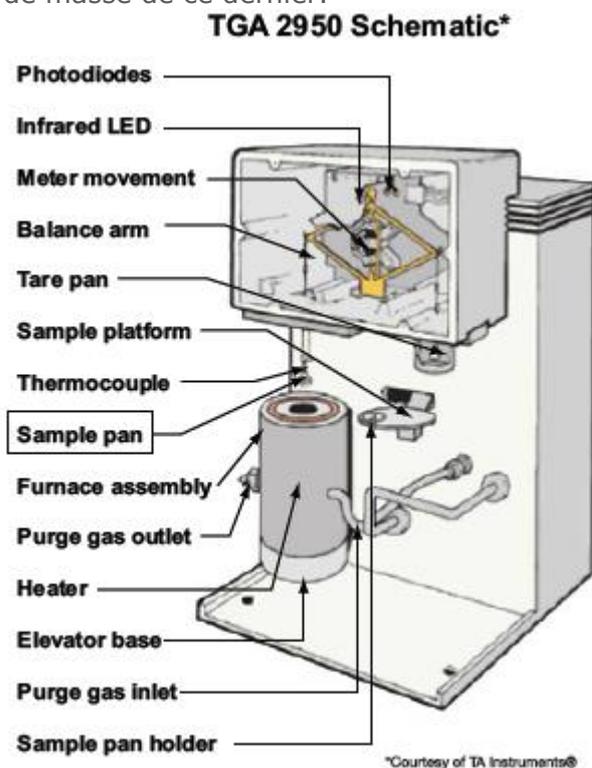


figure 1

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

4.1 Température de dégradation

La sortie d'un scan TGA est généralement un pourcentage de perte de poids comparé à une courbe de température (comme le montre la figure 2). La température de dégradation d'une colle polymérisée peut être calculée de deux manières. La première approche est la température de dégradation à son apparition. Cette température est calculée à partir de l'intersection sur la courbe de la tangente de la pente maximale de la perte de poids avec la tangente de la ligne de base.

La seconde approche est le seuil de 10% de perte de poids en température. Ce calcul est très simple pour les colles non chargées. Dans ce cas, c'est tout simplement la température à laquelle le matériau a perdu 10% de son poids de départ.

Pour les colles chargées, cette perte de poids est déterminée sur la base de la perte de 10% du polymère composant la formulation. Par exemple, si un matériau conducteur est composé de 70% de paillettes d'argent, 30% seulement du système est un polymère. Une perte de 10% de la masse du composant polymère représente une perte de 3% de l'ensemble de la colle.

En général, comme on le voit dans le graphique ci-dessous, les deux méthodes constatent des valeurs très similaires pour la température de dégradation.

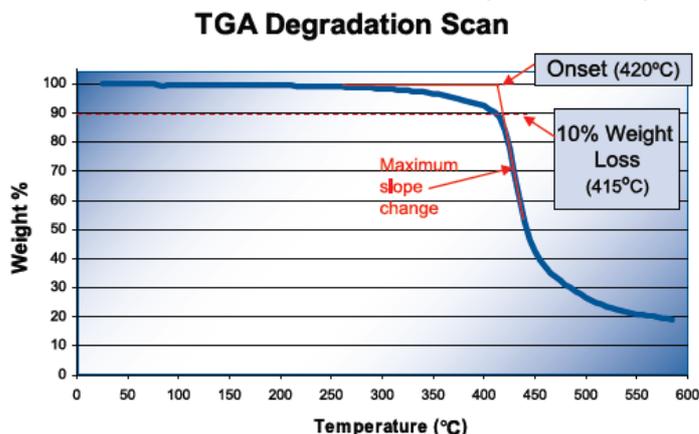


figure 2

En règles générales sur les fiches techniques, les températures extrêmes en fonctionnement continu et en intermittent sont calculées sur la base de la courbe de dégradation de la température. L'extrémité supérieure de la fenêtre de fonctionnement continu est calculée en soustrayant 150°C de la température de dégradation. L'extrémité supérieure de la fenêtre de fonctionnement intermittent est calculée en soustrayant de 50°C de la température de dégradation.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

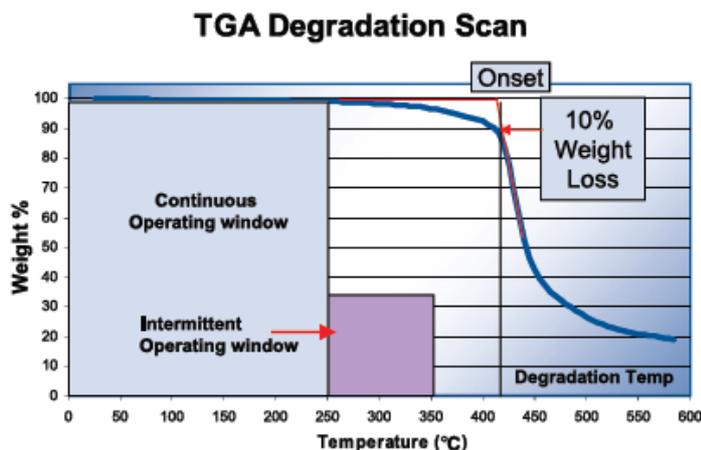


figure 3

Par exemple, pour le matériau de la figure 3, la température de dégradation est environ 420°C. Ainsi, 370°C est la température de fonctionnement l'intermittente et 270°C est la température de fonctionnement en continue. En règle générale, nous ajoutons un facteur de sécurité de sorte que la fiche technique mentionne respectivement 350°C et 250°C en maximal de fonctionnement intermittente et continue.

4.2 Méthode de dégazage (stabilité thermique)

La courbe de perte de poids en fonction de la température est également utilisée pour déterminer la perte de poids à des températures spécifiques. Cette perte de poids est souvent interprétée comme un dégazage ou une stabilité thermique. Les fiches techniques signalent généralement des niveaux de dégazage à 200°C, 250°C et 300°C.

Une perte de poids inférieure à 1,0% à 200°C est requise par la norme MIL-STD 883, méthode 5011 (dégazage faible)

Figure 4 ci-dessous montre un exemple de calcul de dégazage.

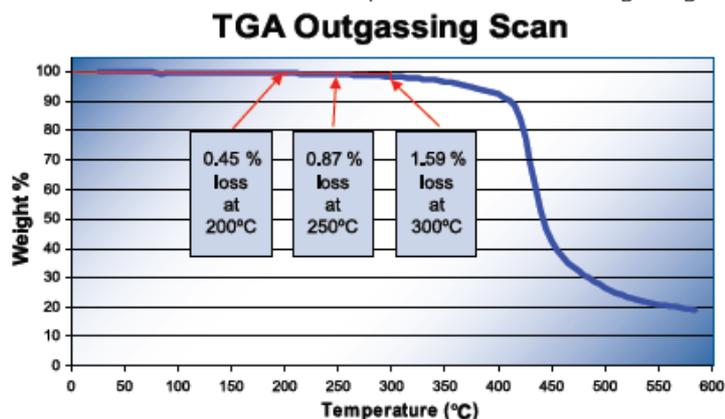


figure 4

Dans l'industrie, l'exigence de dégazage maximum formulée par la NASA reste la référence en terme de spécification. Les produits qui répondent à cette spécification doivent présenter moins de 1,0% de perte total de masse (TML) après avoir été exposé à 125°C pendant 24 heures sous vide. Ils doivent également avoir dégagé moins de 0,1% de matières volatiles condensables (CVCM) au cours de cette exposition.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Le tableau ci-dessous répertorie les produits EPO-TEK qui sont conformes aux normes de dégazage de la NASA.

Epoxy Technology

EPO-TEK Materials Meeting NASA Outgassing Requirements

Product	TML* (<1.0%)	CVCM** (<0.1%)	Cure Time	Cure Temp	Description
302-3M	0.70	0.01	7 Days	25° C	Optical
314	0.77	0	2 Hours	120° C	Optical
353ND	0.81	0.01	1 Hours	120° C	Optical
377	0.54	0.02	1 Hours	150° C	Optical
390	0.43	0.01	30 Min.	25° C	Polyimide
920	0.65	0.01	45 Min.	80° C	Alumina-Filled
930	0.49	0	45 Min.	80° C	Boron Nitride-Filled
E2101	0.32	0.01	1 Hours	150° C	Silver-Filled
E2116	0.32	0.01	1 Hours	150° C	Silver-Filled
E9081	0.13	0.01	1 Hours	220° C	Silver-Filled
E4110-LV	0.97	0.01	3 Days	25° C	Silver-Filled
H20E	0.62	0.01	1 Hours	150° C	Silver-Filled
H20E-PFC	0.76	0.01	1 Hours	150° C	Silver-Filled
H21D	0.19	0	30 Min.	100° C	Silver-Filled
H22	0.99	0.01	20 Min.	100° C	Silver-Filled
H27D	0.52	0.09	1 Hours	150° C	Silver-Filled

Product	TML* (<1.0%)	CVCM** (<0.1%)	Cure Time	Cure Temp	Description
---------	--------------	----------------	-----------	-----------	-------------

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

H31	0.54	0.01	1 Hours	150° C	Silver-Filled
H31-LV	0.47	0.02	1 Hours	125° C	Silver-Filled
H35-175MP	0.33	0.02	1.5 Hours	150° C	Silver-Filled
H37-MP	0.27	0.01	1 Hours	150° C	Silver-Filled
H44	0.27	0	1 Hours	150° C	Gold-Filled
H63	0.19	0.01	1 Hours	120° C	Alumina-Filled
H67-MP	0.37	0	1.5 Hours	150° C	Alumina-Filled
H70E	0.99	0.03	12 Hours	60° C	Alumina-Filled
H72	0.31	0	30 Min.	100° C	Alumina-Filled
H73	0.43	0.01	20 Min.	100° C	Alumina-Filled
H74	0.27	0.01	24 Hours	50° C	Alumina-Filled
H77	0.22	0	1 Hours	125° C	Alumina-Filled
H81	0.62	0	16 Hours	60° C	Gold-Filled
T7109	0.80	0.13	1 Hours	150° C	Boron Nitride-Filled
U300-2	0.97	0.01	30 Min.	150° C	Underfill

* Total Mass Lost

** Collected Volatile Condensable Materials

5.0 Force de cisaillement «Lap shear»

L'industrie de la fibre optique dispose également d'un ensemble d'exigences en matière de dégazage comme par exemple la norme Telcordia GR-1221. La colle polymérisée est chauffée de 50°C à 150°C avec une montée de 5°C/ min dans le TGA. Une perte de poids 0,1% ou moins est considérée comme une preuve d'un système parfaitement polymérisé. Par ailleurs, une perte de poids de 0,25% est admise pour une colle correctement réticulée aux UV.

Les produits EPO-TEK répondant à la norme Telcordia :

Telcordia GR-1221

EPO-TEK®	Cure	Weight Loss @ 150°C
353ND	150°C - 30 min.	0.037%
375	150°C - 30 min.	0.041%
OE184	150°C - 30 min.	0.027%

5.1 Force de cisaillement «Lap shear»

Les résistances au cisaillement par « lap shear » et par « die shear » sont deux tests de résistance au cisaillement couramment utilisés dans le monde du collage pour caractériser la force de liaison des résines époxy. Chacune mesure la force à la rupture d'un adhésif sur un substrat spécifique.



FTPOLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

La résistance au cisaillement « lap shear » est évaluée selon la norme ASTM D1002, "résistance apparente au cisaillement par traction d'un collage entre deux échantillons métalliques". Ce test permet non seulement la détermination de la force nécessaire au cisaillement d'un assemblage époxy entre deux plaques d'aluminium, mais également l'examen de son mode de défaillance qui est tout aussi important.

Chaque éprouvette de test au cisaillement est composée de deux coupons d'aluminium de 2.54 cm de large et nettoyés à l'acide. L'assemblage se fait par recouvrement sur 1.27cm comme présenté sur la figure 1 (vue latérale).

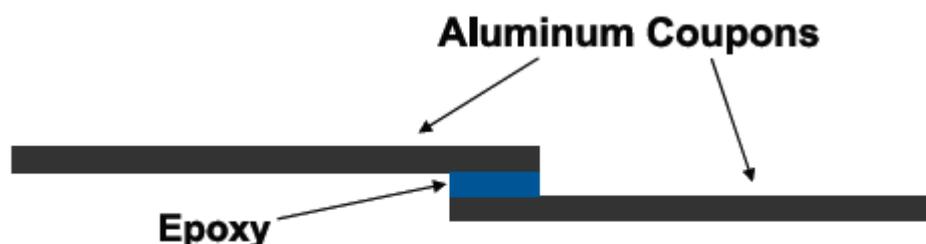


figure 1

Une fois les échantillons assemblés et polymérisés en fonction du profil de cuisson recommandé par la fiche technique, elles sont refroidies à la température ambiante et placées dans le système de test Instron ® pour analyse. Les deux coupons sont serrés verticalement entre des pinces de chaque côté et tiré par deux forces constantes et opposées à 180 degrés.

La force est déterminée par l'opérateur et est augmentée progressivement jusqu'à la rupture du joint de colle ce qui se traduit par une courbe représentée par la figure 2. La résistance au cisaillement de traction est ensuite calculée à partir de la courbe en utilisant la formule suivante:

Résistance au cisaillement (psi) = force de charge maximale (lb) / zone de liaison (in2)

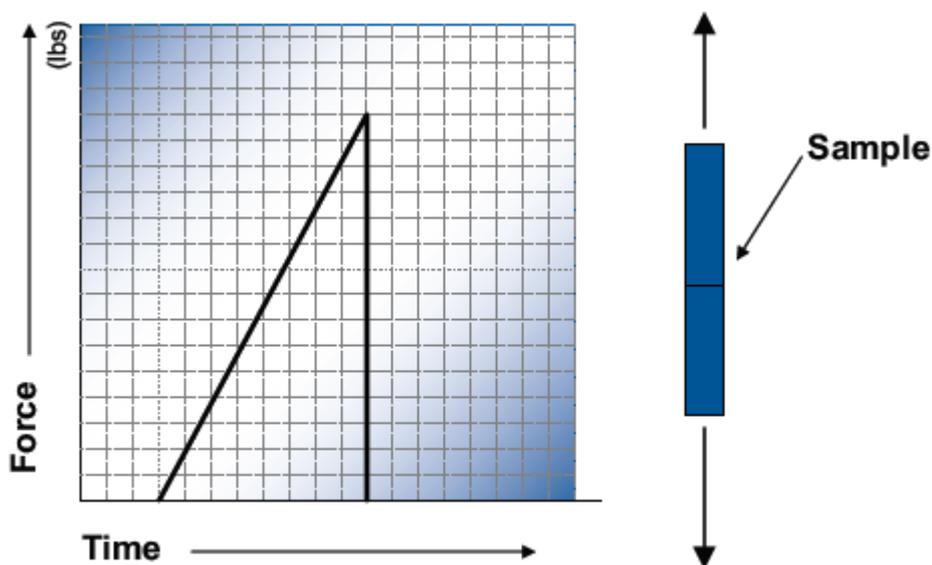


figure 2

Les valeurs typiques de forces de cisaillement s'échelonnent de 500 à 3000 psi. Toutefois, la lecture de la force n'est pas le seul paramètre important de l'essai. La raison de la rupture est tout aussi voire plus importante à prendre en considération. Deux types de défaillances peuvent apparaître : adhésives et cohésives.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Lors d'une rupture adhésive : la colle perd complètement sa liaison avec le substrat, sa force d'adhérence et de liaison est inférieure à sa force de cohésion.

Lors d'une rupture cohésive, la résistance de la colle elle-même n'est pas assez importante pour résister aux forces qui lui sont appliquées. La colle se délamine en laissant des points d'encrages sur les deux coupons aluminium.

Figure 3a et 3b montrent un exemple de deux modes de défaillance.

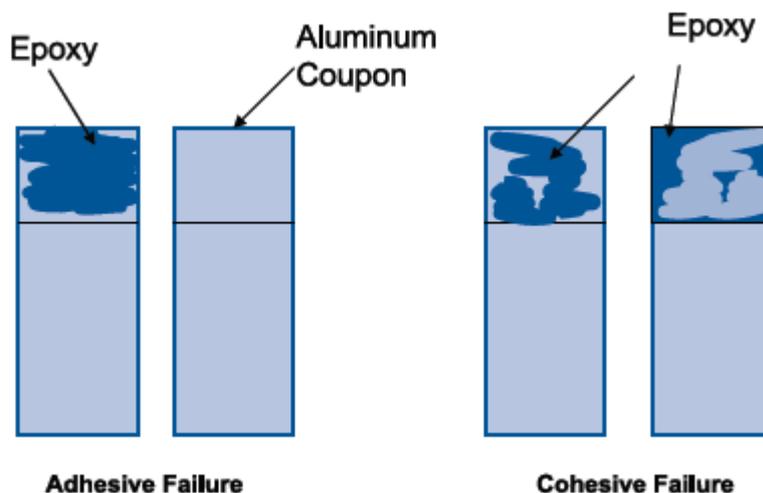


figure 3a

figure 3b

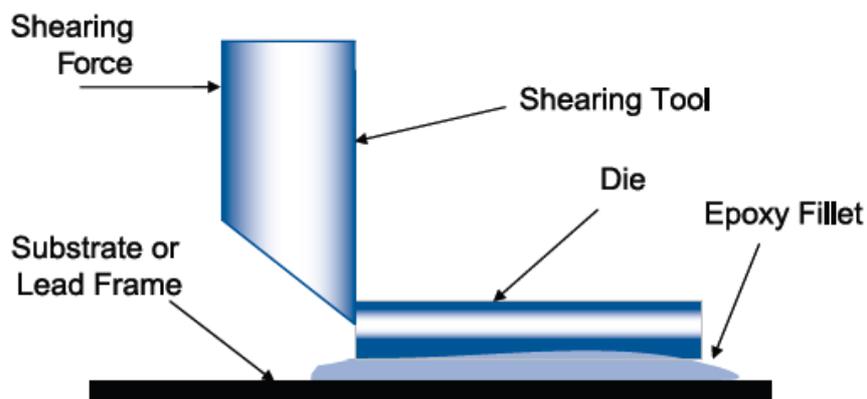
Dans les applications où une charge très élevée et constante est présente, une force d'adhésion à la traction élevée et une bonne tenue mécanique sont recommandées pour le choix du substrat.

High:	2500 – 4000	psi
Average:	1200 – 1900	psi
Low:	< 800	psi

5.2 Force de cisaillement «die shear»

La résistance au cisaillement par le « die shear » est un test commun à l'industrie des semi-conducteurs. Il est utilisé pour déterminer la résistance d'un joint de colle entre une puce silicium et un substrat. En soumettant la puce à une contrainte qui est parallèle au substrat, le résultat est une contrainte de cisaillement à l'interface. Le but des tests de cisaillement sous pression est d'évaluer la qualité globale de la liaison à la fois de la puce et du substrat.

Ce qui suit est une schématique agrandie de l'essai :



La force de cisaillement par « die shear » est généralement exprimée en kilogramme et peut varier considérablement en raison de la composition de la puce et du substrat ainsi que la taille de la puce. Pour les grandes tailles, une baisse de la force exercée est recommandée en raison de la plus grande surface d'encollage.

Généralement les essais de cisaillement se font avec des composants or de 2mmx 2mm sur un substrat Kovar[®] plaqué or.

Plus la valeur est élevée plus l'assemblage par collage est solide.

High:	> 10 kg / 3400	psi
Med:	5 – 10 kg / 1700 – 3400	psi
Low:	<2 – 5 kg / <1000	psi

6.0 Analyse mécanique dynamique (DMA)

La DMA mesure la réponse d'un matériau à une contrainte ou à une déformation oscillatoire (sinusoïdale).

Soit la contrainte imposée est contrôlée et la déformation résultante de l'échantillon est enregistrée, soit la déformation est contrôlée et le niveau de contrainte résultant est mesuré.

Quand un stress est imposé à un système polymère, ce stress sera dissipé à travers le matériau et généralement avec un certain niveau de déformation. Les polymères sont par nature visco-élastomérique Il en résulte qu'une partie seulement de la déformation sera réversible lorsque la contrainte est relâchée. C'est la partie d'élastomérique de la réponse.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Rappelons la loi de Hooke pour un solide élastique idéal :

$$\sigma = k * \varepsilon$$

Where: σ = stress
 ε = strain
 k = spring constant

L'équation ci-dessus montre que la longueur d'un ressort étiré tendu est proportionnelle à la quantité de la contrainte imposée. La proportionnalité est décrite par la constante du ressort k. La constante de rappel peut être considérée comme la rigidité du ressort. Un autre terme pour la rigidité d'un matériau est le module, E.

$$\text{Thus, } E = \sigma / \varepsilon$$

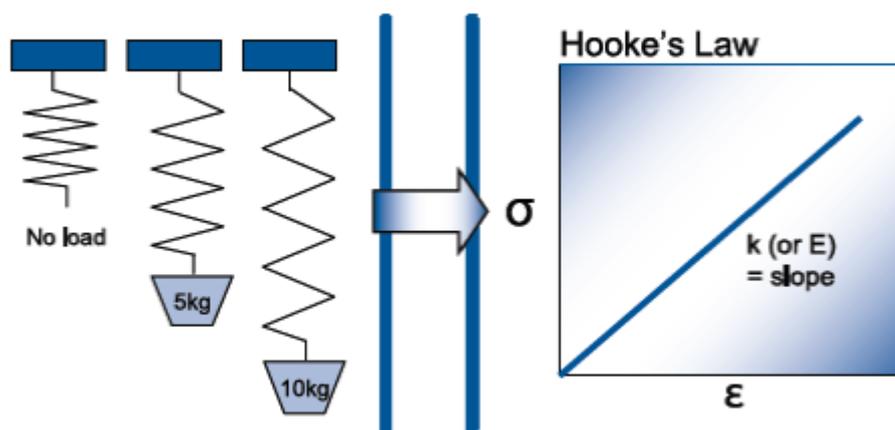


figure 1

Figure 1 ci-dessus montre la loi de Hooke pour la relation linéaire entre la charge appliquée et l'allongement d'un ressort élastique.

Toutefois, comme indiqué ci-dessous (figure 2), si la charge devient trop importante, le ressort sera effectivement soumis à une certaine à une déformation qui sera permanente et, qui ne pourra plus revenir à sa longueur d'origine lorsque la charge sera relâchée.

FTPOLYMER

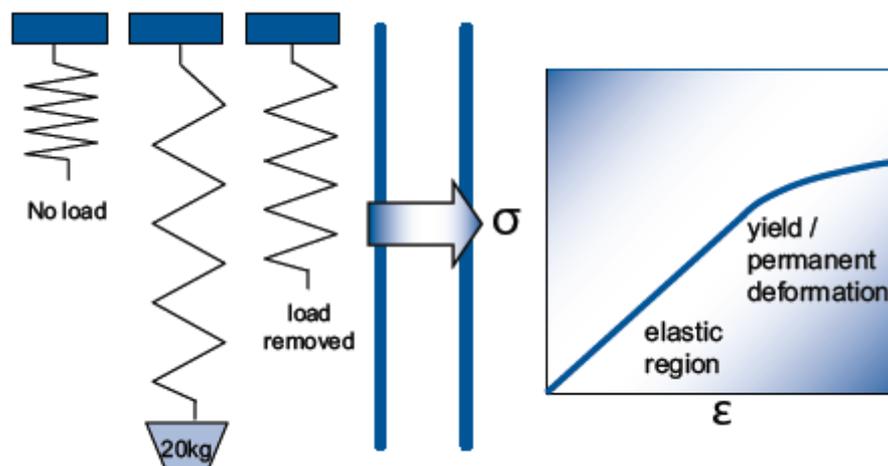


figure 2

Comme le montre les figures 3a et 3b ci-dessous, lorsque de très faibles niveaux de stress sont appliqués à un système polymère, les chaînes de polymères qui sont entrelacées commencent à s'étirer et à se redresser légèrement. Il en résulte un faible niveau de déformation. Toutefois comme le ressort, l'entropie tend à conduire la majorité des chaînes à retourner dans leur position originelle préférentielle dès que la charge est libérée.

Avec des charges plus élevées, comme le montre la figure 3c, les chaînes ne seront pas seulement étirer et dérouler, mais commenceront réellement à se démêler et glisser les unes sur les autres. Cette déformation n'est pas réversible. À l'extrême, le glissement des chaînes devient similaire à un écoulement visqueux. Si le système n'est pas réticulé, les chaînes moléculaires seront éventuellement détruites. Toutefois, si le système est réticulé, il va s'étirer et s'étaler jusqu'à ce que les liaisons entre les chaînes deviennent les seules forces qui les maintiennent ensemble. Finalement les chaînes se rompent et l'échantillon cède.

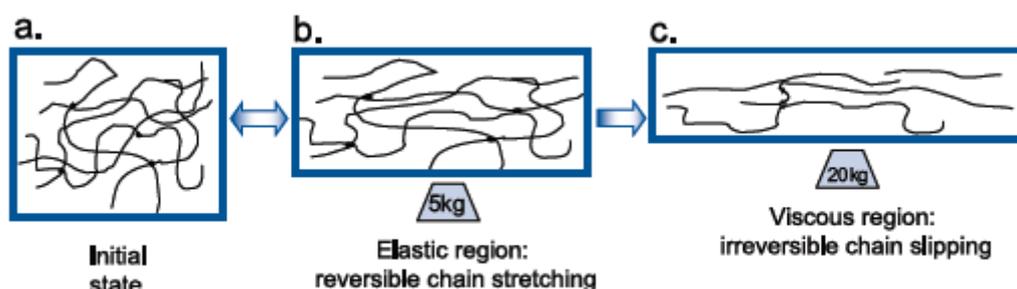


figure 3

Alors que la loi de Hooke décrit le comportement des composants élastomériques d'un polymère face à une contrainte / déformation, la loi des fluides parfaits de Newton est souvent utilisée pour décrire l'autre extrémité de la réponse d'un polymère à la contrainte visqueuse du flux.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

$$\sigma = \eta(dy/dt)$$

Where: σ = stress
 η = viscosity
 dy/dt = strain rate

L'équation de Newton montre que la quantité déplacée d'un fluide idéal dans un temps donné est proportionnelle à la force de la contrainte imposée. La proportionnalité est décrite par la viscosité du fluide.

Souvent, les amortisseurs de voiture sont utilisés pour illustrer le comportement de ce flux visqueux. Comme le montre la figure 4, la vitesse à laquelle le liquide est poussé à travers les trous du piston est dépendante de la contrainte / charge placée sur l'amortisseur.

Contrairement à la déformation réversible du ressort, le déplacement du fluide dans l'amortisseur est entièrement irréversible. Ainsi, tous les efforts qui ont été effectués sur l'amortisseur sont dissipés dans le fluide.

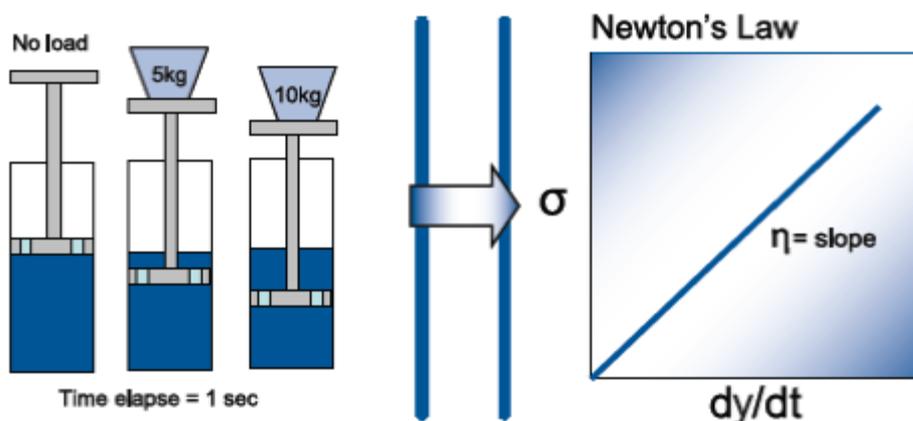


figure 4

Vous noterez que la composante visqueuse de la déformation introduit le temps comme une variable clé. Comme indiqué précédemment, un polymère répond en premier à une contrainte appliquée, par étirage et déploiement de ses chaînes suivi par un désentrelacement et enfin le glissement des chaînes entre elles. Ces modifications du polymère ont besoin de temps pour se produire.

FTPOLYMER

En conséquence, au fil du temps, la réponse effective d'un polymère à une contrainte appliquée correspond plus à la figure 5 ci-dessous :

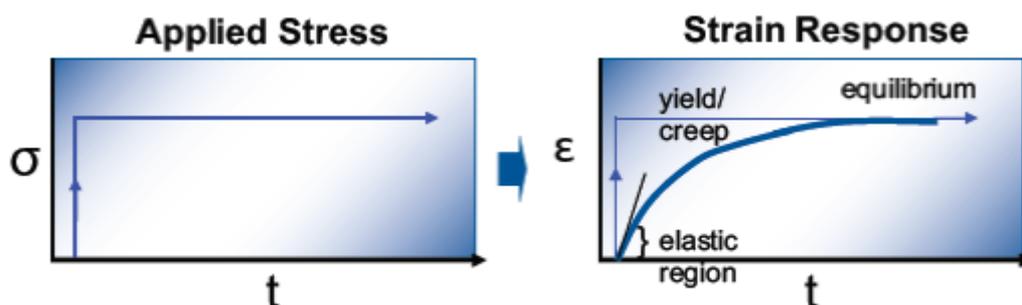


figure 5

Comme le montre le schéma ci-dessus, lorsqu'une contrainte constante ou une charge est appliquée à un système polymère, la première réponse est un étirement et déploiement des chaînes résultant de la déformation élastomérique. Si le polymère était un vrai ressort, la déformation parviendrait rapidement à un point d'équilibre et aucune déformation supplémentaire ne se produirait (comme un poids suspendu à l'extrémité d'un ressort).

Pendant, avec un système visco-élastomérique sous une charge soutenue, les chaînes du polymère commencent à se désentrelacer et à glisser légèrement. Le processus de désentrelacement permettra également au polymère de s'étirer un peu plus.

Le glissement et l'étirement supplémentaire entraîne une déformation additionnelle dans le temps, appelée fluage. Finalement, les chaînes se seront étendues au maximum de leur possibilité et les déformations suivantes viendront du glissement des chaînes visqueuses n'ayant plus de liaisons.

Beaucoup de modèles mécaniques ont été développés pour simuler le comportement visco-élastomérique. Un des plus populaires est le modèle à 4 éléments illustré par la figure 6 ci-dessous. Le premier ressort régit la réponse initiale élastique, suivie d'un mix d'éléments ressort et d'amortisseur en parallèle, puis, enfin, l'aspect purement amortisseur visqueux en série avec tout ce qui précède.

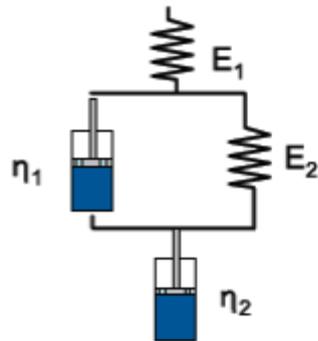
FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

4 Element Model



$$\varepsilon(t) = \left(\frac{\sigma_0}{E_1}\right) + \left(\frac{\sigma_0}{\eta_1}\right)t + \left(\frac{\sigma_0}{E_2}\right)\left(1 - e^{-\frac{t}{\eta_2/E_2}}\right)$$

figure 6

Lorsque la contrainte/charge est libérée, l'entropie va lentement provoquer le retour des chaînes polymères étirées à leur état d'origine. Toutefois, seule la partie élastique de la déformation reviendra à son état initial et l'échantillon aura cependant subi une déformation relative par rapport à son état d'origine. (figure 7).

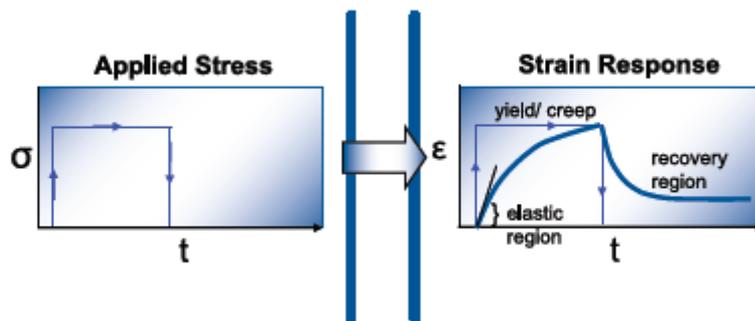


figure 7

Le dernier élément clé qui peut avoir un impact sur le comportement contrainte / déformation d'un matériau est la température. Comme le montre la figure 8, des températures plus élevées augmentent la mobilité des chaînes polymères.

Pour une charge donnée sur un même matériau, il en résulte une déformation plus rapide et plus importante que dans le cas d'une température plus basse.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

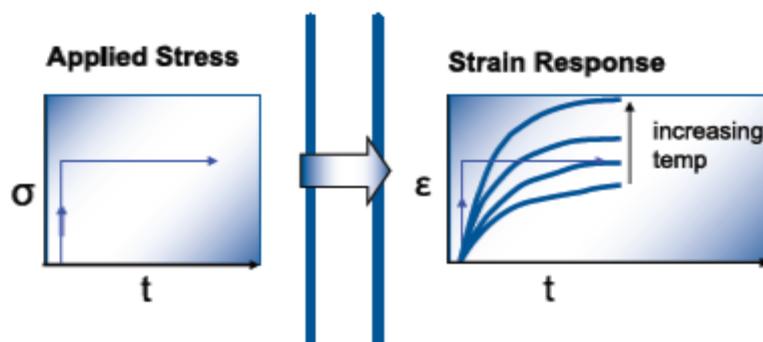


figure 8

Essais dynamiques

Comme mentionné au tout début de cette section, l'analyse mécanique dynamique mesure généralement la réponse par la déformation d'un matériau à une contrainte oscillante appliquée. Dans certains cas, la contrainte appliquée est contrôlée, et le résultat du niveau de contrainte dans le matériau est mesuré, mais cela est moins courant.

La figure 9 montre quelques-unes des nombreuses possibilités géométriques d'essais pour DMA.

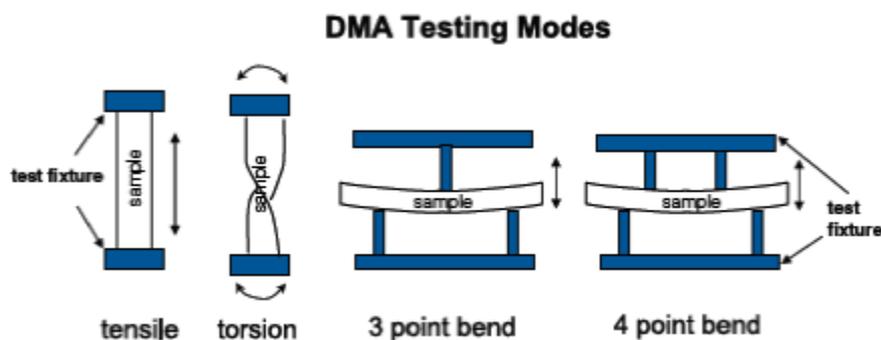


figure 9

Quelle que soit la forme de contrainte apportée à l'échantillon (traction, torsion ou flexion), toutes les DMA donnent soit une contrainte ou une déformation sinusoïdale pour un échantillon donné et mesurent la réponse du matériau.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

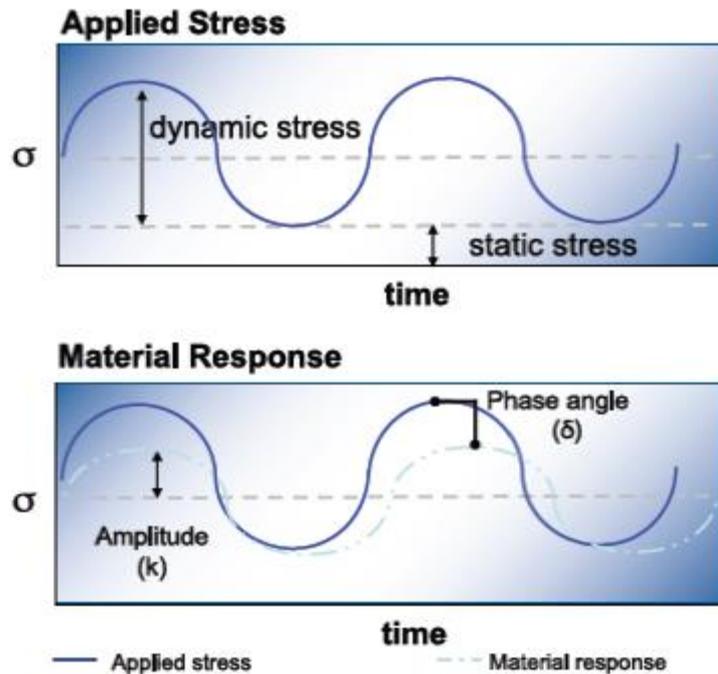


figure 10

Par conséquent, si l'équation concernant la contrainte appliquée au matériau ci-dessus est donné par :

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$$

Where: σ = stress at a given time
 σ_0 = the maximum applied stress
 ω = the frequency of the oscillation

La constante du matériau dépendra de son degré relatif d'élasticité par rapport à son caractère visqueux. Plus le matériau est élastomérique, plus la réponse sera proche du profil de la contrainte appliquée. Cependant, plus le matériau est visqueux, plus il faudra de temps à celui-ci pour circuler et répondre à la charge appliquée. La déformation sera moins réversible.

Par conséquent, la réponse en déformation qui en résulte pour le matériau de la figure 10 sera déphasée par rapport à la contrainte appliquée par une quantité δ :

$$\varepsilon = \varepsilon \sin(\omega t + \delta)$$

La déformation peut être étendue à la forme:

$$\varepsilon = \varepsilon \sin(\omega t) \cos \delta + \varepsilon \cos(\omega t) \sin \delta$$

FTPOLYMER

Cette expression montre que la déformation est en fait composée de deux termes opposés à 90° l'un de l'autre. L'équation ci-dessus peut alors être écrite en termes de la contribution des composantes réelles et imaginaires:

$$\varepsilon = \varepsilon' \cos(\omega t) + i \varepsilon'' \sin(\omega t)$$

Le premier terme contient la composante réelle. Cela représente la partie de la réponse de déformation qui est due à la nature élastique du matériau. Le second terme est la partie déphasée de la réponse, qui reflète la capacité du matériau à dissiper l'énergie à travers des mécanismes visqueux. Le Module complexe de la matière peut être calculé en divisant l'équation de la contrainte par celle de la déformation :

$$E^* = \sigma / \varepsilon' + \sigma \varepsilon''$$

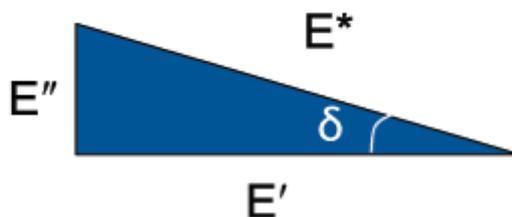
$$E^* = E' + E''$$

Where: E' = the real or "storage" modulus

E'' = the imaginary or "loss" modulus

Le rapport du module de perte au module de stockage (module d'élasticité) est connu sous le nom $\tan(\delta)$:

$$\tan(\delta) = E'' / E'$$



La $\tan(\delta)$ est un paramètre significatif, car elle représente le ratio de la viscosité par rapport à la contribution élastique du matériau à une condition donnée.

Bien que les deux valeurs absolues et relatives, des modules de stockage et de la perte à la température ambiante, sont précieuses, généralement la DMA est gérée comme une fonction de la température. Mesurer la réponse d'un matériau au stress oscillant sur une large plage de température donne une mine de renseignements sur les transitions thermiques. Par exemple, la DMA offre une technique de plus haute résolution pour mesurer la Tg d'un matériau.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

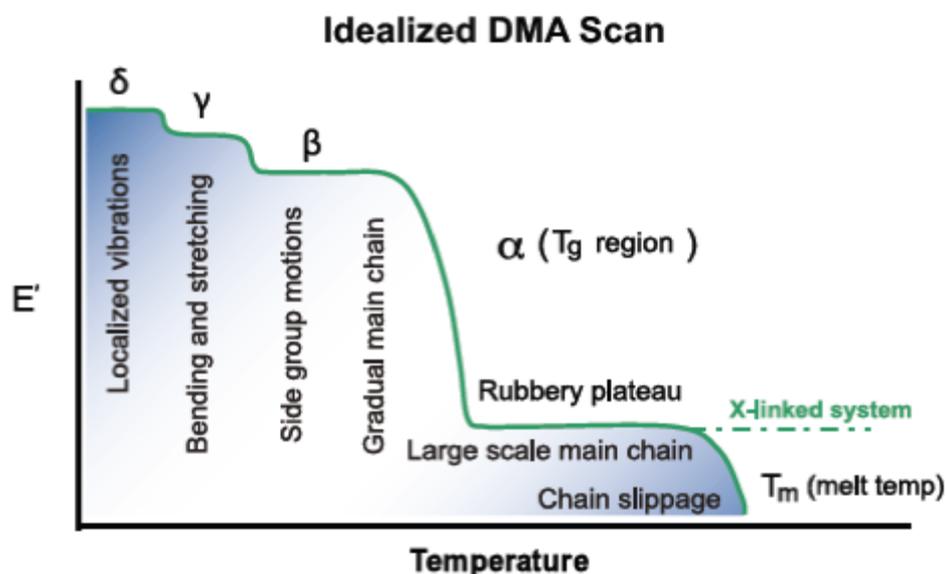


figure 11

Le balayage type d'une DMA représenté dans la figure 11 montre comment le changement du module d'élasticité d'un matériau avec la température peut être en mesure de révéler beaucoup de choses sur sa transition thermique. La transition la plus fréquemment signalée thermiquement pour un polymère thermodurcissable est sa température de transition vitreuse (T_g).

Comme indiqué précédemment, la T_g d'un matériau n'est pas réellement une transition thermodynamique discrète, mais est en réalité une région de températures dans laquelle la mobilité des chaînes polymères augmente de façon significative et les changements de matériaux à l'état rigide ou état vitreux à un état plus caoutchouteux. Ce changement est indiqué par une baisse significative du module d'élasticité lors du changement de réponse du matériau à partir du type élastique vers une déformation encore réversible puis vers un mouvement de la chaîne de plus en plus visqueux et irréversible.

Cette transition importante, la transition alpha (α), est généralement celle d'où la T_g provient. Au-delà de la région de transition vitreuse se situe le "plateau caoutchouteux", région où le rapport entre élasticité et viscosité atteint un équilibre. Pour un produit thermodurcissable polymérisé, ce plateau est maintenu jusqu'à ce que la température de la dégradation soit atteinte. Pour les systèmes non-réticulés la température de fusion sera atteinte à terme et entraînera un écoulement des liquides.

La figure 12 montre un exemple typique d'une courbe de DMA pour une résine époxy. Celle-ci montre à la fois le module de stockage et de perte ainsi que $\tan(\delta)$. A partir de cette courbe, la phase du T_g peut être vue de plusieurs façons.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

La première méthode de calcul de la Tg, la plus courante pour déterminer la Tg, est l'intersection des 2 tangentes dans la courbe du module d'élasticité (E').

Cela indique le point où les mouvements visqueux commencent à se ressentir. La seconde méthode est le sommet de la courbe du module de perte (E'') qui indique le point de glissement maximale de la chaîne dans un système. Enfin, le pic de la tan(δ) la courbe peut être utilisée pour définir la Tg. Ce point indique où le ratio de réponse visqueuse à la réponse élastique est le plus élevé.

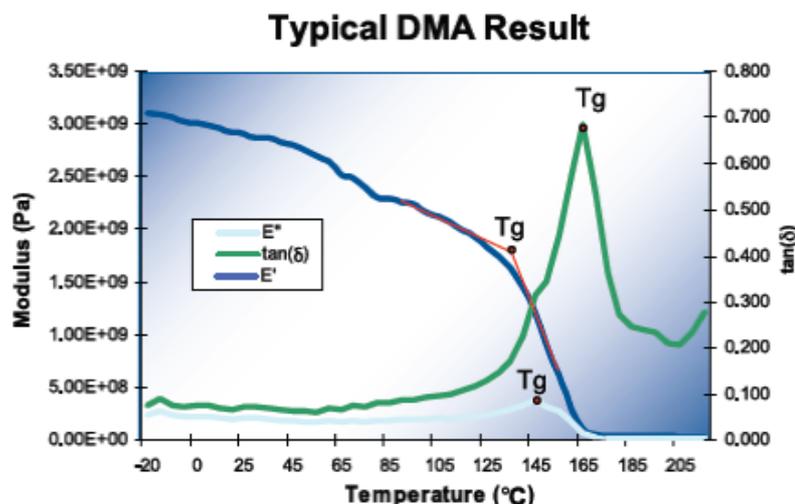


figure 12

Le sommet de la courbe tan(δ) est un point de mesure répandu pour la Tg car il est en général plus facile à isoler. Cependant, ce cas met une nouvelle fois en évidence l'importance de définir comment une Tg est mesurée étant donné que chacune de ces trois méthodes de la détermination de la Tg sont acceptées dans l'industrie, mais qu'elles vous donneront des valeurs toutes différentes. Les Tg calculées à partir du sommet de la tan(δ) seront toujours plus élevées que celles calculées à partir du module de perte d'élasticité. En règle générale, la Tg calculée à partir du facteur de perte se situe dans une position intermédiaire.

La courbe tan(δ) peut être utilisée pour déterminer beaucoup plus d'informations que sa Tg. La largeur du sommet de la tan(δ) peut indiquer jusqu'où un système est homogène. Les systèmes avec de très large sommet sont généralement composés d'un mélange de différentes longueurs de chaîne de polymères. Cela donne lieu à une réponse sur une gamme de température élargie des mouvements de chaînes visqueuses significatives pour les divers composants. D'autre part, les systèmes avec des pics étroits ont généralement une distribution plus restreinte des catégories de chaînes et des poids moléculaires.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

La hauteur ou l'amplitude de la courbe $\tan(\delta)$ est directement liée à la capacité d'un matériau à dissiper l'énergie par mouvements segmentaires. Les systèmes avec de grands pics ont des ratios d'énergie plus hauts absorbant des mouvements visqueux et sont généralement plus durs que ceux avec des amplitudes basses.

L'utilisation finale commune des données d'une courbe de DMA est le plus basique afin de déterminer le module d'élasticité d'un matériau à une température donnée. Cette mesure est destinée à être utilisée dans les calculs de conception d'un assemblage.

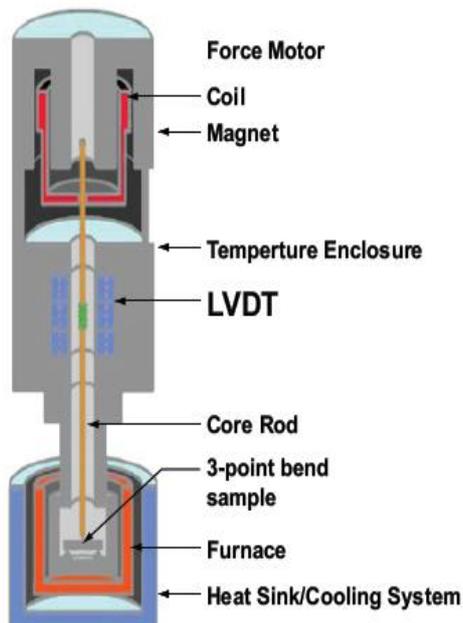
Puisque le module d'élasticité mesure la rigidité d'un matériau, celui-ci est souvent utilisé en association avec la connaissance du CTE du matériau (traité dans le prochain chapitre) afin de définir les niveaux de tension qui pourraient survenir au cours de la dilatation des substrats encollés. Par la suite, le meilleur choix peut être de sélectionner un matériau doté d'un module d'élasticité inférieur ou d'une dureté plus importante pouvant absorber n'importe quelles tensions encourues par la disparité des coefficients d'expansion thermique. Pour ces calculs, on utilise généralement le module d'élasticité, d'autant que nous partons du principe que les déformations du joint de colle seront très probablement assez faibles pour garder l'adhésif dans sa limite élastique

Caractéristiques typiques des gammes pour le module d'élasticité :

High:	>900,000	psi	(generally high Tg)
Med:	400,000 – 900,000	psi	(generally med Tg)
Low:	<150,000	psi	(soft/flex/resilient)

La figure 13 montre le schéma de la chambre de l'échantillon d'une mesure par DMA.

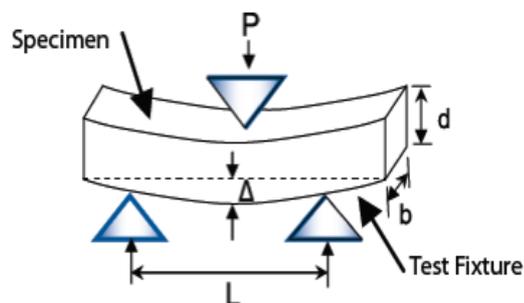
DMA7 SCHEMATIC*



*Courtesy of Perkin Elmer®, Shelton, CT

figure 13

3 Point Bend Set-up



$$E = \frac{L^3 P}{4bd^3 \Delta}$$

figure 14

La figure 14 montre la géométrie de l'échantillon utilisé pour mesurer le module d'un produit Epo-Tek. Une petite lame de matériau (3.0mm x 1.0mm x 18.0mm) est testée en flexion sur trois points.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

7.0 Analyse thermomécanique (TMA)

La TMA est une technique de mesure pour de très faibles dilatations ou contractions d'un matériau quand il est chauffé ou refroidi. L'expansion linéaire d'un matériau en réponse à la température est connue sous le nom de coefficient linéaire thermique d'expansion (CTE).

Le CTE peut être mesurée en utilisant le même équipement que pour l'analyse mécanique dynamique (DMA). Toutefois, pour le CTE, le pointeau et les trois points de pliage sont remplacés par une sonde cylindrique et un porte-échantillon à fond plat (comme le montre la figure 1 ci-dessous).

DMA7 SCHEMATIC*

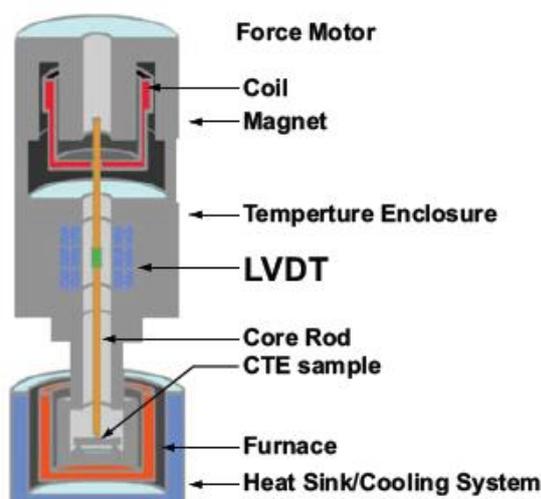


figure 1

*Courtesy of Perkin Elmer®, Shelton, CT

Typiquement, TMA mesure la dilatation linéaire (ou la contraction) d'un matériau sur la base de la variation de hauteur (Δz) d'un échantillon de petite taille. L'échantillon est généralement un petit cylindre ou un cube très plat, aux surfaces supérieures et inférieures parallèles. L'échantillon est placé sur la plate-forme porte échantillon au CTE très faible généralement en quartz. Une sonde à fond plat est abaissée jusqu'à ce qu'elle touche la surface de l'échantillon. Une charge très petite est ensuite appliquée pour s'assurer que la sonde est en contact avec l'échantillon de manière contrôlée. Cette charge reste constante tout au long du balayage. La position de la sonde est détectée en utilisant un transducteur différentiel variable linéaire (LVDT).

Comme l'échantillon subit une rampe thermique, il se dilatera (s'il est chauffé) ou se contractera (s'il est refroidi) sous la sonde. Le LVDT suivra cette position avec la sonde par rapport à la température (figure 2).

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

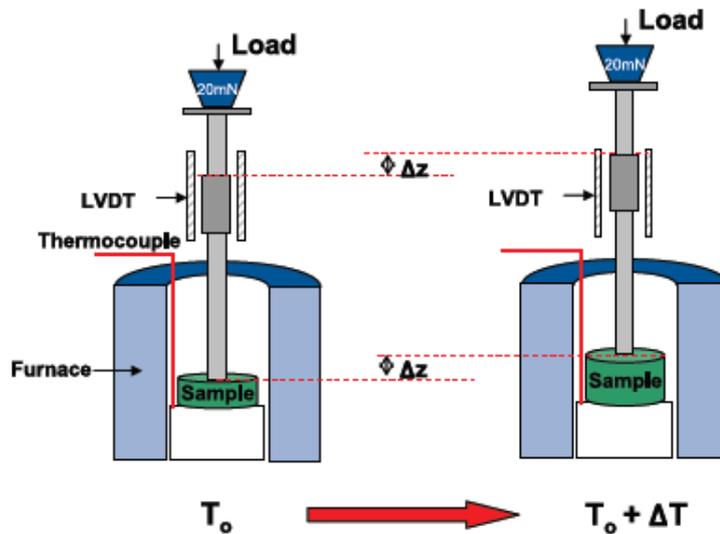


figure 2

La mesure du CTE est effectuée selon la norme ASTM E831 (Méthode normalisée d'essai de dilatation thermique linéaire de matériaux solides par analyse thermomécanique). La figure ci-dessous montre une courbe typique de la TMA position de la sonde par rapport à la température. Le CTE est calculé comme la variation relative de la hauteur de l'échantillon par changement d'un degré de température :

$$\text{CTE } (\alpha) = \text{ppm}/^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha = \frac{1}{h_0} * \frac{dh}{dT}$$

Ainsi, le CTE peut être calculé en divisant la pente de la position de la sonde par rapport à la courbe de température (dh/dt) et multiplié par la hauteur initiale (h °) de l'échantillon.

Sample TMA Curve

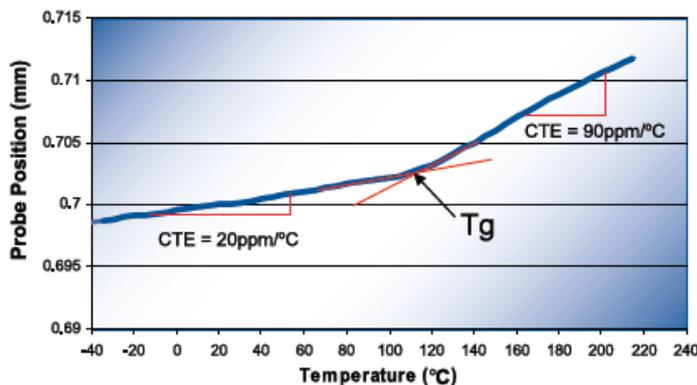


figure 3

Une courbe typique de TMA est montrée dans la figure 3. Elle aura deux progressions différentes; une pente faible à des températures inférieures, et une pente plus forte pour les températures plus hautes.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Le changement d'inclinaison de la pente de la sonde par rapport à la température se fera à la température de transition vitreuse (Tg) du matériau. Dans la région Tg, les chaînes du polymère auront suffisamment d'énergie thermique pour subir des mouvements de plus grande envergure qui permettra un degré plus élevé de dilatation avec la température. Ainsi, la courbe TMA est une méthode pratique pour déterminer la Tg d'un matériau. Il est calculé en trouvant le point auquel les tangentes des deux différentes pentes de la courbe TMA se croisent. En règle générale, le CTE au-dessus de la Tg est de 3 à 4 fois celle du CTE en dessous du Tg.

Du point de vue de la conception technique, il est souvent important de faire correspondre le CTE d'un adhésif le plus étroitement possible aux substrats à coller afin de minimiser le stress au niveau des interfaces. Ainsi, il est important de garder à l'esprit que l'adhésif aura deux coefficients différents d'expansion sur une large plage de température. La température à laquelle cette transition se produit sera également un facteur important. Si la Tg est suffisamment élevée par rapport à la plage d'exploitation du collage, seule la partie inférieure de CTE entrera en jeu. D'autre part, il est également important de garder à l'esprit que le module d'élasticité de l'adhésif chute de manière significative à des températures supérieures à la Tg. Un faible module d'élasticité ou un matériau plus rigide sera en mesure de mieux absorber et de réduire les contraintes encourus par les différences de dilatation thermique.

Voici quelques exemples de valeurs CTE:

Silica Filled:	Lowest	(5-15 ppm /°C)
Alumina Filled:	Good	(25-35 ppm /°C)
Silver Filled:	Average	(40-55 ppm /°C)
Optical (unfilled):	Typical	(55-1000 ppm /°C)

8.0 - La conductivité électrique (Volume de résistivité-VR)

Les applications en semi-conducteurs et en CMS nécessitent des connexions électriques sur les circuits pour leur fonctionnement. Ainsi, la conductivité électrique est très importante pour les performances électriques du circuit. Cependant les polymères sont intrinsèquement des matériaux électriquement isolants. Ils peuvent transmettre l'électricité par l'ajout de charges conductrices électriques.

L'argent et l'or sont les charges conductrices les plus couramment utilisés, l'or ne s'oxyde pas contrairement à l'argent qui reste cependant conducteur. Le type le plus commun d'adhésif électriquement conducteur est un isotrope ; colle conductrice (ICA). Dans ce cas, la distribution des particules de la charge conductrice est homogène à travers l'adhésif, donnant un matériau conducteur dans toutes les directions.

Un type d'adhésif moins courant est un conducteur électrique anisotrope appelé colle conductrice (ACA). Comme représenté dans la figure 1 ci-dessous, la quantité de particules de charges conductrices utilisées dans un ACA est beaucoup plus faible que celle utilisée dans une colle ICA. En outre, la taille des particules dans un ACA est conçue pour être l'épaisseur exacte de la ligne de liaison. Par conséquent, ces matériaux sont électriquement conducteurs dans une seule direction (à travers la ligne de liaison), et sont en réalité électriquement isolante dans les autres directions. La majorité des applications actuelles sont conçues en ICA.

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

La compatibilité chimique du système de résine à la surface du flocon peut également jouer un rôle dans la détermination du degré de conductivité obtenue. Beaucoup de charges métalliques conductrices sont revêtues d'une couche très mince de matériau lubrifiant organique. Ce lubrifiant est nécessaire pour la fabrication de la paillette. La couche de lubrifiant empêche les flocons de se souder ensemble de manière irréversible durant le processus mécanique requis pour aplatir la particule du matériau de départ à la géométrie de flocons souhaitée. La compatibilité du système de résine avec ce revêtement permettra de déterminer comment l'adhésif mouille correctement le flocon. Quand la compatibilité est bonne entre le lubrifiant et le système de résine, les flocons se dispersent et la résine mouille correctement la surface des paillettes.

Bien qu'une pâte ICA non polymérisée puisse avoir un certain degré de conductivité, la conductivité électrique optimale pour un système n'est obtenue que lorsque le matériau est entièrement cuit. Pendant la cuisson d'un système de résine thermodurcissable, les liaisons transversales chimiques qui se forment entre les chaînes polymères permettent aux chaînes de se rapprocher et provoque ainsi une rétractation globale du système. Lorsque la résine se rétrécit, les flocons conducteurs se rapprochent, ce qui réduit l'épaisseur de résine isolante entre les flocons et améliore le flux électrique à travers l'ICA. Ainsi, il est très important de bien polymériser l'ICA dans le but d'atteindre des propriétés électriques optimales.

Résistivité volumique est mesurée selon la norme ASTM D2739, "Méthode d'essai standard pour la résistivité volumique des Adhésifs conducteurs" et MIL-STD 883/5011. Une mince bande de l'ICA est enduite sur une lame de verre.

Les revêtements typiques sont de 3mm de largeur et de 0.07mm d'épaisseur sur la longueur de la lame. L'épaisseur peut être obtenue soit par l'utilisation d'un pochoir pour imprimer la bande, soit avec 2 couches de ruban adhésif Scotch®. Une lame de rasoir peut alors être utilisée pour recouvrir l'ICA dans l'espace formé par le pochoir ou les rubans.

Figure 3 ci-dessous montre un procédé type pour préparer un échantillon VR.

Volume Resistivity Sample Preparation

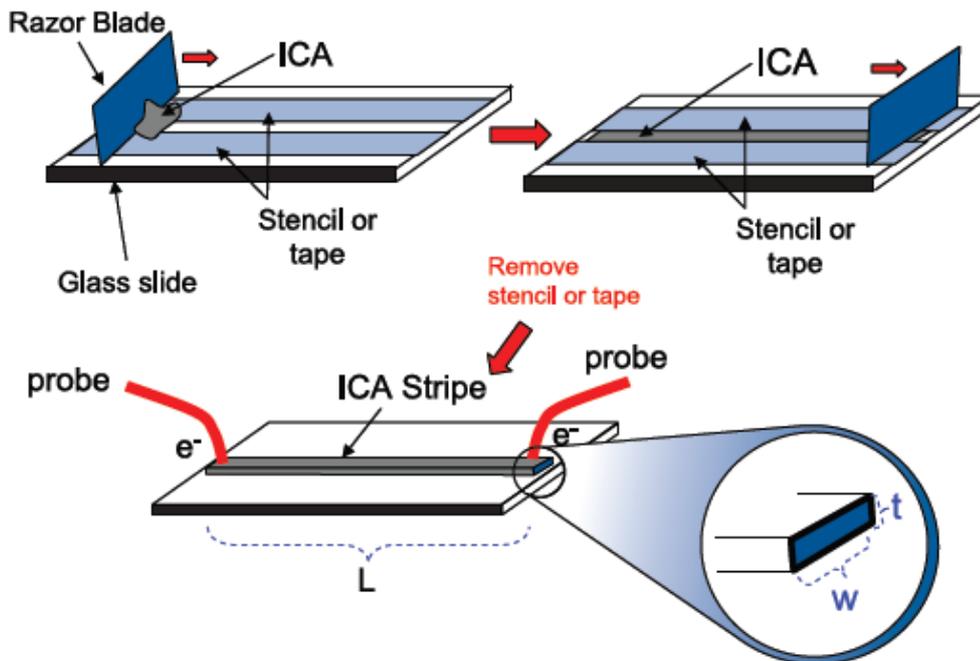


figure 3

FTPOLYMER

FT POLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Une fois que l'échantillon a été préparé et polymérisé, les deux sondes d'un voltmètre sont appliquées aux extrémités de la bande afin de mesurer la résistance entre les extrémités de l'échantillon. La résistivité volumique est ensuite calculée en fonction de l'équation suivante :

$$\square \quad \text{Volume Resistivity (ohm-cm)} = \frac{R * w * t}{L}$$

R = resistance (ohms)
w = width (cm)
t = thickness (cm)
L = length (cm)

9. 0 - Conductivité thermique

Dans la quête continue pour la miniaturisation, la conductivité thermique joue un rôle toujours plus important dans les produits d'aujourd'hui. De plus en plus d'adhésifs sont utilisés pour dissiper la chaleur générée par les composants actifs.

La conductivité thermique est une propriété du matériau fondamental qui est essentiel pour caractériser ce transfert de chaleur.

La conductivité thermique par définition est égale à la quantité de chaleur qui est transférée dans une période de temps spécifique à travers une zone d'échantillon connue, lorsque l'une des faces de l'échantillon est soumise à un gradient de température appliqué.

Les unités de conductivité thermique types sont:

$$\frac{\text{Watts}}{\text{meter * Kelvin}} \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{m * K}} \right)$$

Une des méthodes utilisées pour mesurer la conductivité thermique est ASTM E1461, Laser Flash Diffusivity c'est-à-dire «Méthode d'essai standard pour la diffusivité thermique par la méthode Flash laser ».

Au cours des dernières décennies, cette méthode d'essai a évolué pour devenir l'une des techniques les plus largement utilisées pour la mesure de la diffusivité thermique et la conductivité thermique des matériaux polymères dans l'industrie des adhésifs.

Description de cette technique : la face avant d'un petit échantillon généralement en forme de disque est placée dans un appareil horizontal et chauffé par une énergie (laser) à impulsions courtes. Le résultat de l'élévation de la température dégagée sur la surface est mesuré en fonction du temps et en utilisant un détecteur IR. Bien que ce soit un test assez rapide, la qualité de préparation des échantillons et l'épaisseur de ce dernier sont essentiels pour le résultat final. Ce test est avantageux car il est sans contact et donc non destructif pour l'échantillon.

FTPOLYMER

FTPOLYMER 122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval

Tél : 01 39 13 20 82 - Fax : 01 39 13 33 79

www.ftpolymer.fr

Voici un schéma de l'appareil d'essai :

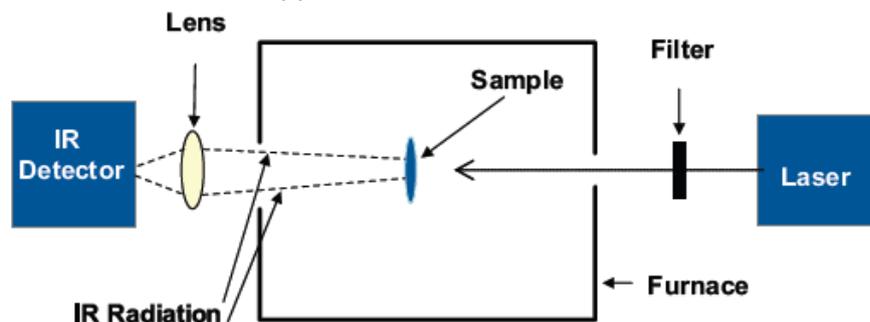


figure 1

La conductivité thermique (THK) = débit de chaleur / (Surface × gradient de température).

Il existe différents types de charges qui présentent des conductivités thermiques exceptionnelles: l'argent, le nitrure de bore (BN) et l'alumine. Ces charges vont assurer la conductivité thermique des résines époxydes qui, par nature, sont des matières thermiquement isolantes.

L'argent offre la meilleure conductivité thermique, mais assure également la conductivité électrique d'une résine. Certaines applications nécessitent un matériau électriquement isolant afin de ne pas affecter les performances d'un boîtier électronique. L'alumine procure cette isolation électrique et permet une bonne conductivité thermique. L'alumine est couramment utilisée pour les applications d'enrobage où l'abrasion n'est pas critique. Pour réduire l'abrasion, le nitrure de bore est souvent utilisé. Cela fournit d'excellentes propriétés thermiques et réduit les phénomènes d'abrasion pour les applications critiques.

En général, une taille et une quantité plus importante de particules se traduira par des propriétés thermiques plus élevées pour les systèmes époxydes.

Exemples de performance pour les époxydes thermiques :

Very High:	> 4.0 W/m ² K (new technologies)
High:	> 2.0 W/m ² K (generally silver filled)
Average:	0.7 – 2.0 W/m ² K (Alumina and BN filled)
Low:	< 0.7 W/m ² K (optical and unfilled materials)
Poor:	0.1 – 0.3 W/m ² K

Filler Type	Thermal Conductivity of Filler Only (W/m ² K)
Alumina	36
Boron Nitride	60
Silver	429

Depuis 1966, Epoxy Technology, Inc. (Epo-Tek®), développe et fabrique des epoxy de haute technologies et de qualité pour les industries de pointe dans le monde entier.

Les produits EPO-TEK sont testés rigoureusement et toujours dans nos laboratoires pour assurer la fiabilité de notre fabrication. Epoxy Technology est certifié ISO 9001, ISO 10993, Reach et RoHS. En tant que leaders de l'industrie, la qualité supérieure de nos produits, le service clientèle exceptionnel et une assistance technique inégalée sont les fondements de notre entreprise.

EPO-TEK produit une gamme complète d'epoxy de haute performance et d'encapsulation pour de nombreux marchés :

- **Semi-conducteur**
- **Optoélectronique**
- **Médical**
- **Automobile**
- **Aérospatial**
- **Photovoltaïque**
- **Militaire**
- **Electronique**

Représenté en France par :



www.EPOTEK.com

Epoxy Technology, Inc.
14 Fortune Drive – Billerica, MA 01821
Tél : 978-667-3805
Fax : 978-663-9782

The logo for FT Polymer, consisting of the words "FTPOLYMER" in a bold, blue, sans-serif font. The letters "P", "O", "L", "Y", "M", and "E" have a horizontal striped pattern.

www.FTPOLYMER.fr

FT Polymer
122, Chemin de la Cavée - 78630 Orgeval
Tél : 01 39 13 20 82
Fax : 01 39 13 33 79

ISO 9001

ISO 10993

RoHS
COMPLIANT
2002/95/ETC

REACH
COMPLIANCE