

Tech Tipp 23

Was > Glasübergangstemperatur (T_g)

Weshalb > Je nach Design und Anwendung ist die T_g ein wichtiger Wert

T_g - Glasübergangstemperatur bei Epoxies

Die Glasübergangstemperatur ist einer der wichtigsten Werte eines Epoxy. Damit wird die Temperatur bezeichnet, bei der sich das Polymer von einem harten, glasartigen Material in ein weiches, gummiartiges umwandelt.

Epoxies sind Duroplaste, welche beim Aushärteprozess chemisch vernetzen. Das ausgehärtete Epoxy hat keinen Schmelzpunkt. Während eines erneuten Erwärmens wird es nicht flüssig (dies im Gegensatz zu thermoplastischen Materialien). Beim Erwärmen bzw. Erhitzen wechselt es jedoch in einen weicheren Zustand.

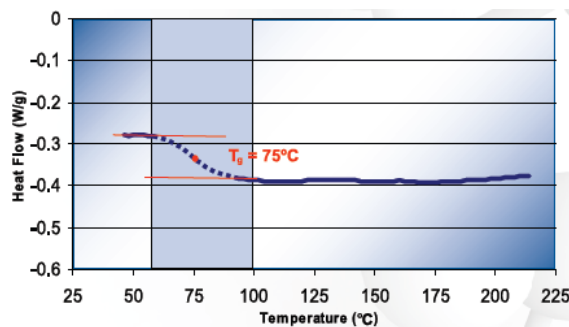
Was genau ist die T_g?

Beim Überschreiten der Glasübergangstemperatur (T_g) – nicht zu verwechseln mit Schmelzpunkt (T_m) - wechselt das Epoxy von einem harten, steifen, glasartigen Zustand in einen weichen, „gummiartigen“ Zustand.

Die T_g ist in Wirklichkeit nicht eine absolute Temperatur sondern ein Temperaturbereich, in welchem sich die Mobilität der Polymerketten signifikant erhöht. Eine Reihe von Faktoren bestimmen letztendlich die T_g: chemische Struktur des Epoxies, Art des Härter und der Aushärtegrad.

Üblicherweise wird die T_g mittels Differential-Scanning-Kalorimetrie (DSC), nach ASTM E1356 gemessen (“Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature by Differential Scanning Calorimetry”).

DSC-Scan eines typischen Epoxies



Ein T_g-Scan ist einem kinetischem Scan sehr ähnlich, nur dass der T_g-Scan mit einem ausgehärteten Muster durchgeführt wird. Auf der X-Achse wird die Temperatur festgehalten, auf der Y-Achse der Wärmestrom (s. Bild oben).

Wie oben schon erwähnt ist die T_g vielmehr ein Temperaturbereich statt ein spezifischer Temperaturwert. Dies, weil die vernetzten Polymerketten unterschiedliche Freiheitsgrade in ihrer Beweglichkeit je nach eingesetzter thermischer Energie haben.

Es ist jedoch eine Gepflogenheit, den Mittelwert des Temperaturbereichs als T_g auszuweisen, begrenzt durch die Tangenten der beiden flachverlaufenden Regionen der Wärmestromkurve. Im oben gezeigten Beispiel würde die T_g mit 75°C angegeben werden.

Die T_g ist auch abhängig vom Aushärtegrad. Normalerweise basieren die auf den Datenblättern angegebenen T_g-Werte auf einer 100% Vernetzung (100% Umwandlung).



Beeinflussen der Tg eines Epoxies

Die Tg wird von der Aushärtung beeinflusst. Tiefe Härtetemperaturen resp. Raumtemperatur (RT) werden die tiefst mögliche von allen möglichen Tg's für diese chemische Zusammensetzung ergeben.

Sehr hohe Tg-Werte sind nie erreichbar mit einer RT-Aushärtung. Wird das gleiche Material jedoch bei einer erhöhten Temperatur ausgehärtet resultiert als Folge auch eine höhere Tg.

So kann ein Epoxidklebstoff eine Tg zwischen 60°C und 110°C haben, abhängig von der gewählten Aushärtung. Das ist auch mit ein Grund, weshalb es so wichtig ist, eine genaue Temperaturkontrolle in der Produktion zu haben.

Zusätzlich kann die Tg eines Epoxies durch Aufnahme von Feuchte reduziert werden – ein Faktor, der bei Anwendungen mit Feuchte berücksichtigt werden sollte.

Weitere Tg-Überlegungen

Normalerweise weisen Klebstoffe mit der höchsten Tg auch die beste Temperaturbeständigkeit und deshalb auch die höchsten Zugfestigkeiten bei hohen Temperaturen auf.

Mit Ausnahme von erheblichen exothermischen Reaktionen im Zusammenhang mit der Aushärtung kann als generelle Regel gesagt werden, dass die Tg nicht wesentlich höher sein kann als die höchste Temperatur während der Aushärtung. Für weitere Details dazu s. Broschüre „Die Aushärtung machts...“.

Auswirkung der Tg auf:

Modul:

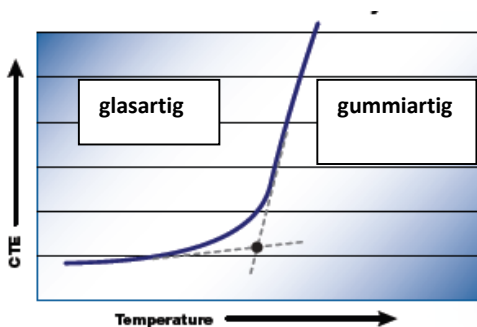
Grundsätzlich gilt die folgende Abhängigkeit von Modul zu Klebstoff: je höher die Tg, umso höher die quervernetzte Dichte und das Modul. Wird ein Epoxy über die Tg erhitzt sinkt das Modul. Das ist bezeichnend für den Wechsel von glasartig/hart in einen weicheren Zustand.

Eine hohe Tg mit einem hohen Modul resultiert in eine hohe Steifigkeit, was in den meisten Fällen gleichzusetzen ist mit einem tiefen Dehnungsvermögen und einer eher geringfügigen Energievernichtung bei RT. Das Modul unterhalb der Tg hat ein primär reziprokes Verhältnis mit Temperatur.

Zugscher- und Abscherfestigkeit:

Mit Anstieg der Temperatur sinken Zug- und Abscherfestigkeit eines Epoxies. Nebenbei bemerkt wird dieser Effekt oft als Mittel zum Entfernen eines gehärteten Epoxies benutzt. Mit dem Erweichen des Epoxies treten überwiegend kohäsive Brüche auf. Dies erlaubt es, die zwei verklebten Substrate einfacher zu lösen.

Thermomechanische Analyse



Thermischer Ausdehnungskoeffizient (CTE)

Beim Überschreiten der Tg findet eine weitere wichtige physikalische Veränderung im Klebstoff statt: der Ausdehnungskoeffizient (CTE) erhöht sich. Mit dem Anstieg der Temperaturen erweicht das Epoxy und verliert etwas seiner inneren Festigkeit, d.h. es wird „beweglicher“ und dehnt sich mehr aus. Normalerweise ist es ein fließender Übergang zwischen der beiden CTE's im Tg-Bereich.

Auch anhand der CTE-Kurve ist die Tg resp. der Tg-Bereich ersichtlich. (Schnittpunkt der beiden CTE-Kurven während der Aufzeichnung „Ausdehnung in Abhängigkeit der Temperatur“.

Kann ich ein Epoxy oberhalb seiner Tg einsetzen?

Sicher! Im Gegensatz zu Lötzinn hat ein Epoxy keinen Schmelzpunkt. Es wird nicht mehr flüssig, auch nicht bei thermischen Zyklen. Eine durch die kovalente Bindung produzierte Kraft in der gehärteten Epoxystruktur zwingt das etwas weichere („dehnbarere“) Epoxy in seine ursprüngliche Struktur zurück wenn die Temperatur wieder auf unterhalb der Tg gesenkt wird. Manchmal ist es vorteilhaft, wenn die Betriebstemperatur einer Anwendung höher als die Tg des eingesetzten Epoxies liegt, da die zusätzliche Flexibilität/Elastizität oberhalb der Tg die Klebeverbindung die Schock- und Vibrationsbeständigkeit erhöht. Extrem fragile Komponenten werden so auch eher geschützt als wenn das Epoxy sehr hart ist.