

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-8-47-54>

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СТЕКЛОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ПРЕПРЕГОВ МЕТОДОМ ДСК

© Константин Игоревич Карезин\*, Екатерина Ивановна Попова,  
Роман Евгеньевич Невский, Алексей Владимирович Соковишин

Всероссийский НИИ автоматики имени Н. Л. Духова (ФГУП «ВНИИА»), Россия, 127030, Москва, ул. Сушчевская, д. 22;

\*e-mail: mailbox75@vniia.ru

*Статья поступила 14 марта 2024 г. Поступила после доработки 29 марта 2024 г.  
Принята к публикации 24 июня 2024 г.*

Препреги электротехнического назначения используют в качестве склеивающей прокладки отдельных слоев при изготовлении многослойных печатных плат. Они представляют собой материалы, получаемые путем пропитки стеклоткани смесью модифицированных эпоксидных смол. Температуру стеклования ( $T_{ст}$ ) отвержденного препрега определяют методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Данный подход универсален, предусматривает широкие границы инструментальных параметров и не содержит численных значений метрологических характеристик. В работе представлены методика определения  $T_{ст}$  с учетом требований ГОСТа и условий проведения экспериментов и оценка ее метрологических характеристик. Исследовали отвержденные образцы препрегов российского и зарубежного производств. Термограммы записывали на двух пробах для каждого образца,  $T_{ст}$  рассчитывали по переходу стеклования на кривой второго нагрева со скоростью 20 °C/мин. Показано, что относительная суммарная погрешность методики составляет  $\pm 4$  %. Поскольку в отдельных случаях на термограммах отвержденных препрегов видимый переход стеклования не фиксировался, проводили линейную аппроксимацию зависимости  $T_{ст}$  от высоких скоростей нагрева, при которых переход стеклования выражен заметно лучше, к значению скорости 20 °C/мин. Контроль правильности определения осуществляли на образцах, для которых можно было уверенно определить  $T_{ст}$  экстраполяционным и классическим экспериментально-расчетным способами. Установлено, что оба метода расчета приводят к одинаковым результатам в пределах погрешности анализа. Полученные результаты могут быть использованы при определении  $T_{ст}$  препрегов электротехнического назначения и входном контроле соответствующих изделий.

**Ключевые слова:** дифференциальная сканирующая калориметрия; электротехнические препреги; температура стеклования; степень отверждения; скорость нагрева; метрологические характеристики.

## DETERMINATION OF THE GLASS TRANSITION TEMPERATURE OF ELECTROTECHNICAL PREPREGS BY DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY (DSC)

© Konstantin I. Karezin\*, Ekaterina I. Popova,  
Roman E. Nevskiy, Alexey V. Sokovishin

Dukhov Automatics Research Institute (FSUE VNIIA), 22, ul. Sushchevskaya, Moscow, 127030, Russia;

\*e-mail: mailbox75@vniia.ru

*Received March 14, 2024. Revised March 29, 2024. Accepted June 24, 2024.*

Electrotechnical prepregs are used as gluing gasket in the manufacture of multilayer printed circuit boards. These materials are obtained by fiberglass impregnation with a mixture of modified epoxy resins. The glass transition temperature ( $T_g$ ) of the cured prepreg is determined by differential scanning calorimetry. This universal approach provides a wide range of instrumental parameters and does not contain numerical values of metrological characteristics. We present a methodology of  $T_g$  determination taking into account the requirements of GOST and experimental conditions and assess the metrological characteristics of the technique. Cured samples of prepregs produced in Russia and abroad were studied. Thermograms were recorded for two samples of each prepreg.  $T_g$  was calculated from the transition on the curve of second heating at a rate of 20 °C/min. It has been shown that the relative total error of the method is  $\pm 4$ %. Since in some cases the visible glass transition was not recorded on the thermograms of cured prepregs, a linear approximation of the  $T_g$  dependence from a high heating rate at which the glass transi-

tion is more pronounced to the value of 20 °C/min was carried out. Control of the correctness of the determination was carried on samples for which  $T_g$  can be confidently determined by extrapolation and traditional experimental-calculation methods. It is shown that both extrapolation and calculation methods lead to the same results within the limits of the analytical error. The obtained results can be used for determining  $T_g$  of electrotechnical prepregs and incoming inspection of the corresponding product.

**Keywords:** differential scanning calorimetry; electrotechnical prepregs; glass transition temperature; degree of cure; heating rate; metrological characteristics.

Введение

Препреги электротехнического назначения используют в качестве склеивающей прокладки отдельных слоев при изготовлении многослойных, гибко-жестких и теплоотводящих печатных плат [1, 2]. Они представляют собой материалы, получаемые путем пропитки стеклоткани смесью модифицированных термореактивных эпоксидных смол.

Один из контролируемых параметров, показывающих степень отверждения связующего, — температура стеклования ( $T_{ст}$ ) слоистого материала, получаемого из препрега [3 – 5]. Техническими условиями (ТУ 22.29.29-025-96330920–2022, ТУ 22.29.29-018-96330920–2020) регламентировано определение  $T_{ст}$  отвержденного препрега методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) (ГОСТ Р МЭК 61189-2). Требования сформулированы таким образом, чтобы испытания можно было проводить на любом приборе ДСК, с любым металлическим тиглем в широком интервале масс образцов. Следствие такого подхода — необходимость установления метрологических характеристик для каждого конкретного условия выполнения определений.

Цель работы — разработка методики определения  $T_{ст}$  с учетом требований ГОСТа и условий проведения экспериментов и оценка ее метрологических характеристик для последующего входного контроля препрегов.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали отвержденные образцы препрегов российского и зарубежного производств (табл. 1) [6, 7]. Параметры режима отверждения препрегов соответствовали рекомендованным производителем для прессования многослойных

печатных плат: подъем температуры до 190 °C с последующей выдержкой в течение времени до 1,5 ч. Перед измерениями образцы выдерживали в сушильном шкафу с принудительной вентиляцией в течение 2 ч при 105 °C, далее они кондиционировались выдержкой в десикаторе с силикагелем минимум 2 ч при комнатной температуре.

Калориметрические испытания проводили с использованием дифференциального сканирующего калориметра PerkinElmer DSC 8500 (США) (держатель образца — стандартный алюминиевый тигель, закрытый крышкой, газ продувки — азот, скорость продувки — 20 мл/мин). Массу пробы определяли на электронных весах Ohaus DV215CD (точность взвешивания — 0,1 мг). Эксперименты проводили по установленной температурной программе (ГОСТ Р МЭК 61189-2) (табл. 2).  $T_{ст}$  определяли как температуру в средней точке перехода, расчет проводили по термограмме повторного нагрева образца.

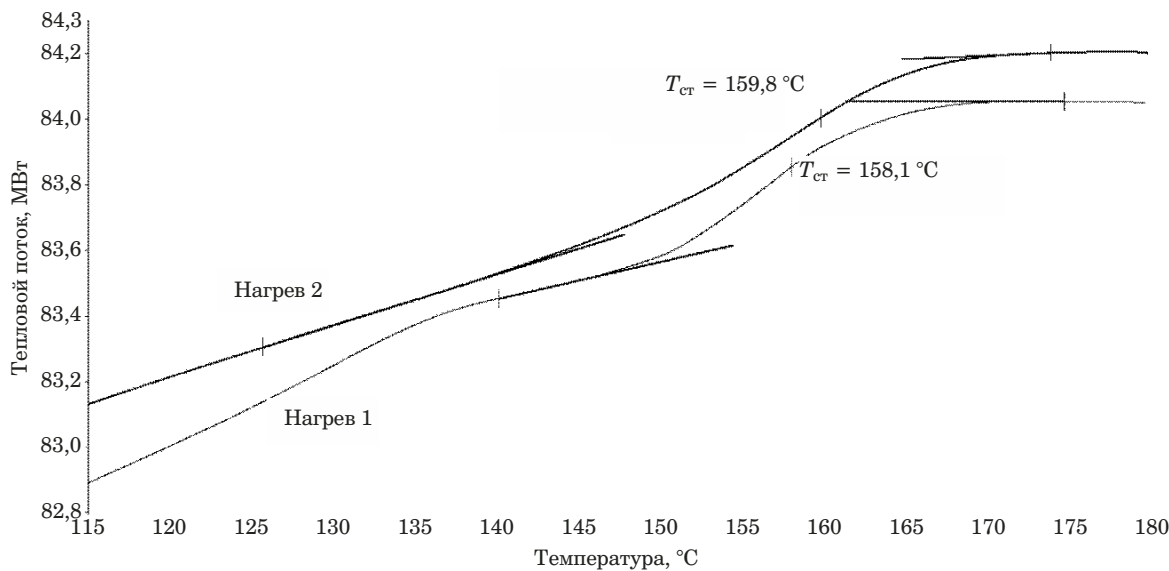
Заметим, что ожидаемая  $T_{ст}$  — температура стеклования, указанная производителем препрега в соответствующей документации. Для исследуемых материалов предполагалось, что она будет находиться в интервале 165 – 180 °C.

Обсуждение результатов

Разработка методики определения  $T_{ст}$  на основе ГОСТа. Рекомендуются проводить повторный нагрев образца, по результатам которого определяется  $T_{ст}$ , на скорости 10° C/мин (ГОСТ Р МЭК 61189-2). Вместе с тем часто применяемая скорость нагрева образца, при которой определяется  $T_{ст}$ , составляет 20 °C/мин [8 – 10]. Поэтому прежде всего необходимо убедиться в том, что при пониженной скорости переход стеклования будет фиксироваться.

Таблица 1. Исследуемые отвержденные препреги  
Table 1. Cured prepregs under study

| Препрег                             | Технические условия        | Производитель              |
|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| ЭМ-5Н-1078-63                       | 22.29.29-025-96330920-2022 | АО «Электромаш» (Россия)   |
| ЭМ-5-2116-57                        | 22.29.29-018-96330920-2020 | АО «Электромаш» (Россия)   |
| IT-180GNBS-Low Flow Prepreg 1078 MF | 2001.0412.2014-20183       | ITEQ Corporation (Тайвань) |
| IT-180ABS-2116-53                   | 2001.0412.2014-20165       | ITEQ Corporation (Тайвань) |



**Рис. 1.** Термограммы первого и второго нагревов препрега ЭМ-5Н-1078-63  
**Fig. 1.** First and second heating curves of EM-5N-1078-63 prepreg

Предварительные эксперименты, проведенные для всех исследуемых препрегов, показали, что в ряде случаев переход стеклования при скорости нагрева 10 °С/мин на термограмме не фиксируется. В некоторых случаях это наблюдалось и при нагреве при 20 °С/мин. В дальнейших испытаниях использовали скорость 20 °С/мин, так как ГОСТ, помимо рекомендуемой, допускает ее применение.

В соответствии с температурной программой и установленной скоростью второго нагрева (см. табл. 2) рассчитывали  $T_{ст}$  препрегов по среднему значению из двух параллельных измерений. На рис. 1 приведены термограммы нагревов препрега ЭМ-5Н-1078-63. Полученные результаты систематизированы в табл. 3.

Видно, что для трех из четырех препрегов  $T_{ст}$  удовлетворяет требованиям ТУ.  $T_{ст}$  препрега

**Таблица 2.** Параметры температурного режима эксперимента  
**Table 2.** Temperature program of the experiment

| Стадия | Процесс    | Температура, °С                  |                                  | Скорость или длительность |
|--------|------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
|        |            | начальная                        | конечная                         |                           |
| 1      | Нагревание | 30                               | На 15 °С выше ожидаемой $T_{ст}$ | 20 °С/мин                 |
| 2      | Выдержка   | На 15 °С выше ожидаемой $T_{ст}$ |                                  | 5 мин                     |
| 3      | Охлаждение | На 15 °С выше ожидаемой $T_{ст}$ | 30                               | 100 °С/мин                |
| 4      | Выдержка   | 30                               |                                  | 5 мин                     |
| 5      | Нагревание | 30                               | На 25 °С выше ожидаемой $T_{ст}$ | 10 (20) °С/мин            |

**Таблица 3.** Рассчитанные температуры стеклования препрегов  
**Table 3.** Calculated glass transition temperatures

| Препрег                                | Масса образца, мг | $T_{ст}$ , °С | $T_{ст}$ среднее, °С | Норма $T_{ст}$ по ТУ, °С |
|----------------------------------------|-------------------|---------------|----------------------|--------------------------|
| ЭМ-5Н-1078-63                          | 13,5              | 159,8         | 159,2                | Не менее 165             |
|                                        | 12,5              | 158,5         |                      |                          |
| ЭМ-5-2116-57                           | 16,0              | 174,8         | 176,2                | Не менее 170             |
|                                        | 16,9              | 177,6         |                      |                          |
| IT-180GNBS-Low Flow<br>Prepreg 1078 MF | 10,4              | 182,3         | 183,0                | Не менее 175             |
|                                        | 10,7              | 183,6         |                      |                          |
| IT-180ABS-2116-53                      | 17,9              | 176,2         | 177,5                | Не менее 175             |
|                                        | 17,7              | 178,8         |                      |                          |

ЭМ-5Н-1078-63 оказалась заметно ниже установленной в ТУ. Вероятность ошибочного результата исключали серией повторных определений (они показывали аналогичное численное значение  $T_{ст}$ ). Низкое значение температуры стеклования может быть связано как с химической природой исходного неотвержденного препрега, так и с недостаточным его отверждением.

*Метрологические характеристики методики.* Поскольку предлагаемая методика может быть использована при параметрическом контроле препрегов по параметру «Температура стеклования слоистого материала, приготовленного из препрега», она должна иметь установленные метрологические характеристики. Так, общую погрешность (точность) методики  $U_t$  можно определить по формуле (ГОСТ Р МЭК 61189-2)

$$U_t = \pm \sqrt{U_s^2 + U_r^2} + U_i, \quad (1)$$

где  $U_s$ ,  $U_r$  — систематическая (правильность) и случайная (прецизионность) составляющие погрешности;  $U_i$  — погрешность интерполяции.

Под погрешностью интерполяции понимают 20 % от разницы между значениями соседних делений шкалы прибора, по которому ведут отсчет определяемой величины. В нашем случае регистрация сигнала осуществлялась управляющим программным обеспечением, и данная составляющая погрешности включалась в состав инструментальной погрешности прибора.

Систематическую составляющую погрешности оценивали, исходя из измерений определяемого параметра для аттестованного стандартного образца (СО). В связи с тем, что  $T_{ст}$  — условный параметр, характеризующий интервал температур, в котором происходит релаксационный переход, оценить систематическую составляющую погрешности можно исключительно расчетным способом, суммируя погрешности, не относящиеся к случайным флуктуациям. В термоанализе к таковым можно отнести погрешность взвешивания образца, инструментальную погрешность определения температуры и погрешность программного обеспечения при определении значений экстремумов на термограммах. Суммарная оценка данных факторов в нашем случае дает для правильности значение 3,2 % (для анализируемого температурного интервала).

Случайная составляющая погрешности  $U_r$  вычисляется по формуле

$$U_r = t\sigma/\sqrt{n}, \quad (2)$$

где  $t$  — критерий Стьюдента;  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение;  $n$  — объем выборки.

Объем выборки должен составлять не менее 20 определений (ГОСТ Р 8.997). Если методика

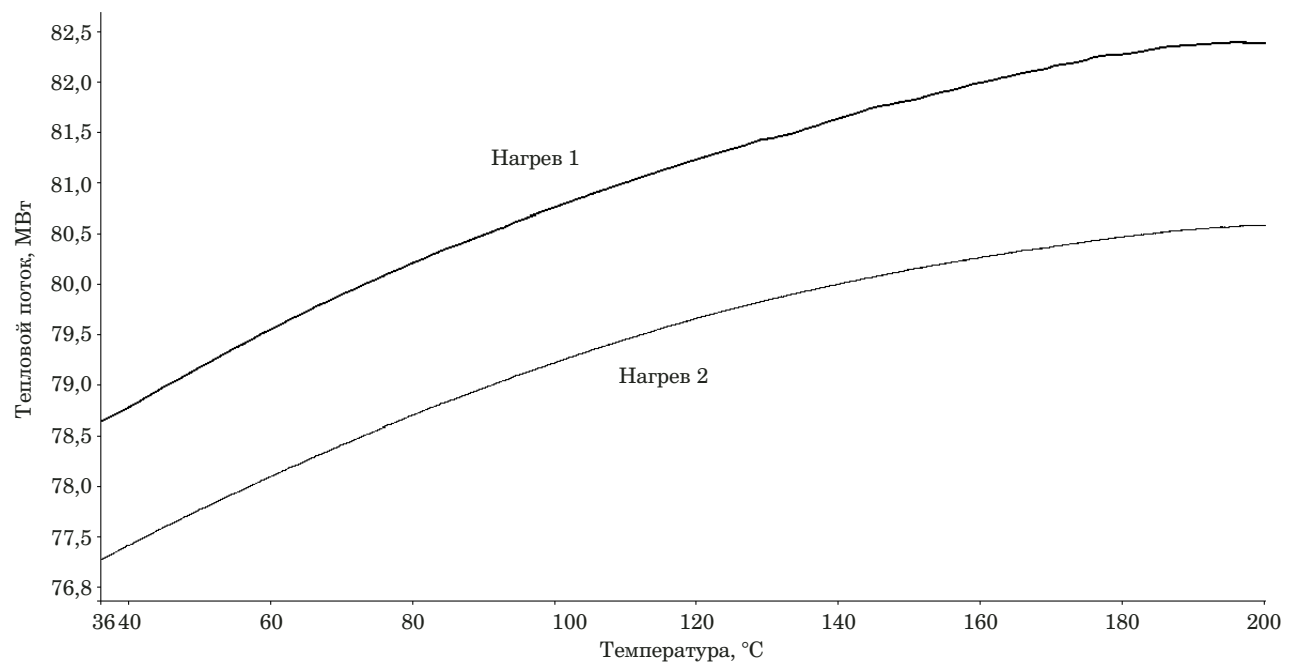
предусматривает параллельные измерения, как в данном случае, то число определений подразумевает, что результат каждого из них — это среднеарифметическое. Критерий Стьюдента для 20 определений составляет 2,09 при доверительной вероятности 95 %. Температуры стеклования эпоксидных препрегов, для определения которых разрабатывалась методика, лежат в достаточно узком температурном интервале. Поэтому набор статистической информации ограничили одним препрегом — ЭМ-5Н-1078-63.

В результате проведенных экспериментов среднее значение  $T_{ст}$  по 20 параллельным определениям составило 157,6 °С, среднее квадратичное отклонение — 3,5 °С. По (2)  $U_r = 1,6$  °С (около 1 % в исследуемом диапазоне температур стеклования), таким образом, суммарная погрешность методики может быть оценена как 3,4 %. Консервативно для дальнейших расчетов приняли, что она составляет 4 %. Действительно, все 40 параллельных измерений  $T_{ст}$  препрега ЭМ-5Н-1078-63 уверенно входят в интервал  $157,6 \pm 6,3$  °С.

*Методологический подход к определению  $T_{ст}$  методом экстраполяции.* В ряде экспериментов по определению  $T_{ст}$  препрегов использовали образцы, в которых при скоростях нагрева 10 и 20 °С/мин переход стеклования не фиксировался на термограмме (рис. 2). Расчет  $T_{ст}$  посредством дифференцирования термограммы также не привел к успеху вследствие низкой интенсивности пика первой производной на фоне шумов.

Запись термограмм на скоростях, в несколько раз превышающих стандартные (режим fast-scan или hyperscan), наряду с очевидным существенным повышением скорости анализов, позволяет повысить чувствительность регистрации выходного сигнала и, как следствие, использовать для анализа микрограммовые количества вещества, что может быть полезным при исследовании тонких пленок, биологических объектов и токсичных соединений [11 – 15]. Кроме того, использование высоких скоростей сканирования при анализе материалов дает возможность исключить артефакты, связанные с возможной перегруппировкой и структурированием надмолекулярных образований при медленном росте температуры, и исследовать морфологическое состояние вещества в исходном состоянии [16, 17].

На образцах крахмала с трудно идентифицируемым переходом стеклования было показано, что повышение скорости нагрева образца приводит к увеличению высоты перегиба на термограмме, соответствующего процессу стеклования полимера [18]. В то же время рост скорости нагрева сдвигает область фазовых и релаксационных переходов, в том числе переход стеклования, в область более высоких температур, причем ве-



**Рис. 2.** Термограммы первого и второго нагревов препрега ЭМ-5Н-1078-63 с плохо идентифицируемым переходом стеклования

**Fig. 2.** First and second heating curves for EM-5N-1078-63 prepreg with weakly expressed glass transition

личина сдвига прямо пропорциональна скорости. Используя эту закономерность, можно вычислять  $T_{ст}$ , экстраполируя ее зависимость к нулевой скорости нагрева.

В нашем случае экстраполяцию кривых выполняли до скорости нагревания 20 °C/мин, которую чаще всего применяют при определении  $T_{ст}$  в калориметрических испытаниях. Отметим, что важно было не только разработать способ определения  $T_{ст}$ , но и оценить, попадают ли результаты экстраполяции в доверительный интервал разра-

ботанной методики, основанной на ГОСТ. Для оптимизации процесса определения  $T_{ст}$  и объективности сравнения результатов первыми выполнялись стадии 1 – 5 (см. табл. 2), затем на тех же образцах — стадии 6 – 17 (табл. 4).  $T_{ст}$  определяли по результатам двух параллельных измерений. Измерения проводили при скоростях нагрева 40, 70 и 100 °C/мин. Получаемые термограммы приведены на рис. 3.

Зависимости  $T_{ст}$  от скорости нагревания представлены на рис. 4. Видно, что эксперимен-

**Таблица 4.** Температурный режим экспериментов по определению  $T_{ст}$  методом экстраполяции  
**Table 4.** Temperature program of experiments for  $T_g$  determination by the extrapolation technique

| Стадия | Процесс    | Температура, °C                  |          | Скорость или длительность |
|--------|------------|----------------------------------|----------|---------------------------|
|        |            | начальная                        | конечная |                           |
| 6      | Выдержка   | На 25 °C выше ожидаемой $T_{ст}$ |          | 5 мин                     |
| 7      | Охлаждение | На 25 °C выше ожидаемой $T_{ст}$ |          | 100 °C/мин                |
| 8      | Выдержка   | 30                               |          | 5 мин                     |
| 9      | Нагревание | 30                               | 205      | 40 °C/мин                 |
| 10     | Выдержка   | 205                              |          | 5 мин                     |
| 11     | Охлаждение | 205                              | 30       | 100 °C/мин                |
| 12     | Выдержка   | 30                               |          | 5 мин                     |
| 13     | Нагревание | 30                               | 215      | 70 °C/мин                 |
| 14     | Выдержка   | 215                              |          | 5 мин                     |
| 15     | Охлаждение | 215                              | 30       | 100 °C/мин                |
| 16     | Выдержка   | 30                               |          | 5 мин                     |
| 17     | Нагревание | 30                               | 230      | 100 °C/мин                |

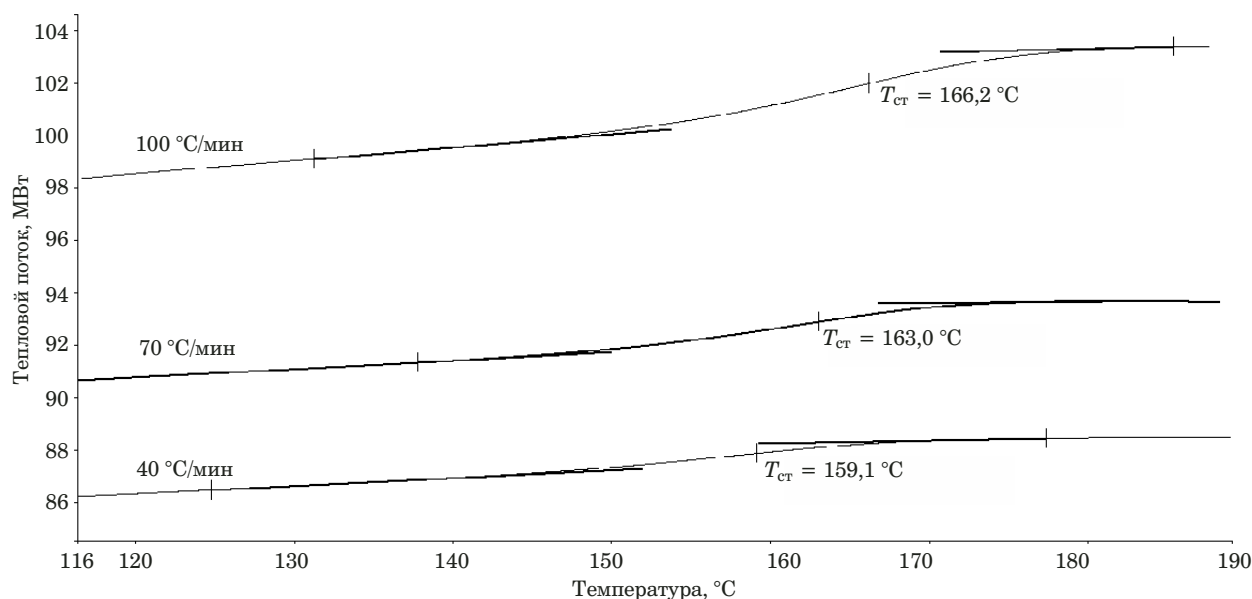


Рис. 3. Термограммы препрега ЭМ-5Н-1078-63, полученные при различных скоростях нагрева

Fig. 3. Heating curves for EM-5N-1078-63 prepreg obtained at different heating rates

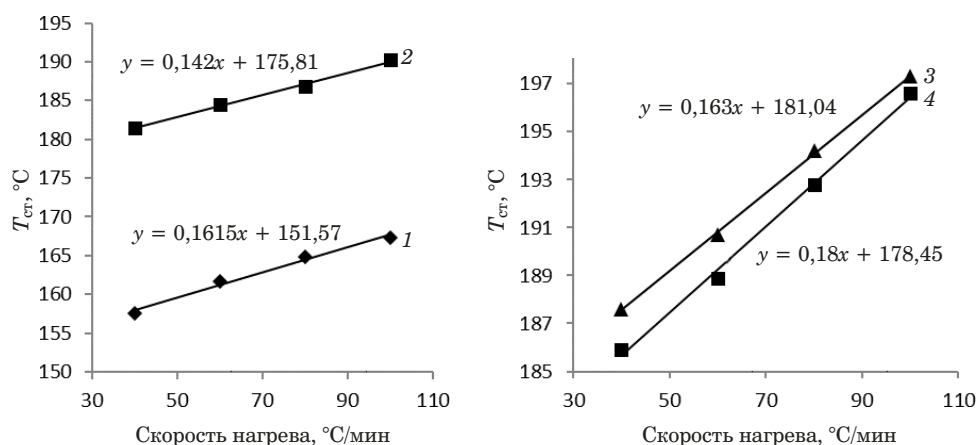


Рис. 4. Зависимости  $T_{ст}$  препрегов ЭМ-5Н-1078-63 (1), ЭМ-5-2116-57 (2), IT-180GNBS-Low Flow (3), IT-180ABS-2116-53 (4) от скорости нагрева

Fig. 4. Dependences of the glass transition temperature of prepregs EM-5N-1078-63 (1), EM-5-2116-57 (2), IT-180GNBS-Low Flow (3), IT-180 ABS-2116-53 (4) on the heating rate

тальные точки удовлетворительно ложатся на прямую. Рассчитанные коэффициенты корреляции составили: 0,9931, 0,9975, 0,9997, 0,9984 (для ЭМ-5Н-1078-63, ЭМ-5-2116-57, IT-180GNBS-Low Flow, IT-180ABS-2116-53 соответственно).

Значения  $T_{ст}$ , полученные методом экстраполяции, оказались выше значений, полученных непосредственной обработкой термограмм, однако находятся в рамках границ установленной погрешности методики (табл. 5).

Оценка применимости разработанной методики для входного контроля препрегов. Ввиду отсутствия СО с аттестованной  $T_{ст}$  невозможно однозначно заключить, какой из исследованных методов оценки дает наиболее близкое к истин-

ному значению  $T_{ст}$ . Можно утверждать, что результаты, получаемые по любому из подходов, укладываются в установленный экспериментальным методом интервал погрешности ( $\pm 4\%$ ), что позволяет признать их идентичными в пределах ошибки и определять  $T_{ст}$  по наиболее приемлемому методу.

Предложенные методики могут быть применены при входном контроле эпоксидных препрегов по параметру «Температура стеклования слоистого материала, изготовленного из препрега». В этом случае о соответствии материала требованиям ТУ необходимо судить с учетом установленной погрешности измерения. Для исследуемых препрегов нижняя граница экспе-

**Таблица 5.** Температуры стеклования препрегов, °C, полученные в прямом эксперименте и методом экстраполяции (скорость нагрева — 20 °C/мин)**Table 5.** Glass transition temperatures of prepregs, °C, obtained in a direct experiment and by the extrapolation method (heating rate — 20 °C/min)

| Препрег             | Эксперимент | Расчет | $T_{ст, \text{расчет}} - T_{ст, \text{эксп}}, ^\circ\text{C}$ |
|---------------------|-------------|--------|---------------------------------------------------------------|
| ЭМ-5Н-1078-63       | 154,3 ± 6,2 | 154,8  | 0,5                                                           |
| ЭМ-5-2116-57        | 176,2 ± 7,0 | 178,7  | 2,5                                                           |
| IT-180GNBS-Low Flow | 183,1 ± 7,3 | 184,3  | 1,2                                                           |
| IT-180ABS-2116-53   | 179,3 ± 7,2 | 182,1  | 2,8                                                           |

риментально полученной  $T_{ст}$ , ниже которой материал должен быть признан не соответствующим требованиям ТУ, составляет, не менее, °C: 158,4 (ЭМ-5Н-1078-63), 163,2 (ЭМ-5-2116-57), 168,0 (IT-180GNBS-Low Flow, IT-180ABS-2116-53). Норма  $T_{ст}$  по ТУ приведена в табл. 3.

Во всех случаях испытаний, большинство которых проводили на основе препрега ЭМ-5Н-1078-63, результат анализа, полученный по двум параллельным определениям, оказывался ниже нормируемого по ТУ значения  $T_{ст}$ . При этом иногда он оказывался ниже нормы даже с учетом погрешности, а иногда укладывался в норму только с учетом погрешности измерения. Среднее значение  $T_{ст}$ , полученное по 20 результатам анализа, — 157,6 °C. Это свидетельствует, что данный образец следует признать не прошедшим входной контроль. Заметим, чтобы минимизировать вероятность браковки годного материала, необходимо повторять анализ на основе трех параллельных определений (ГОСТ Р МЭК 61189-2).

## Заключение

Таким образом, на основе ГОСТ Р МЭК 61189-2 разработана методика определения  $T_{ст}$  эпоксидных препрегов электротехнического назначения методом ДСК. По экспериментальным данным определены  $T_{ст}$  для четырех образцов промышленно выпускаемых препрегов. Три из четырех образцов показали значение  $T_{ст}$ , соответствующее регламентному.

С учетом статистической оценки случайной составляющей погрешности методики и вклада инструментальных погрешностей было рассчитано, что общая погрешность определения  $T_{ст}$  не превышает ±4 %. Учитывая установленную погрешность методики, можно утверждать, что  $T_{ст}$  для одного из исследованных образцов не соответствует ТУ.

Для образцов эпоксидных препрегов с плохо выраженным переходом стеклования предложено проводить измерения с высокими скоростями нагрева (40, 60, 80 и 100 °C/мин) с последующей экстраполяцией  $T_{ст}$  к скорости нагрева 20 °C/мин. Показано, что такой подход в пре-

делах установленной погрешности анализа приводит к тем же значениям  $T_{ст}$ , что и разработанная на основе ГОСТа методика, и может быть успешно использован при проведении параметрического контроля.

## Финансирование

Работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Дополнительных грантов на проведение или руководство данным исследованием не привлекались.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Xie C., Zou H., Wei-Yao., Wang M. Research on reliability of non-flow prepreg filling in automotive R-F PCB / 16<sup>th</sup> International microsystems, packaging, assembly and circuits technology conference (IMPACT). — Taipei, Taiwan, 2021. P. 82 – 85. DOI: 10.1109/IMPACT53160.2021.9697053
2. Liu T., Devarajan M. Influence of prepreg material properties on printed circuit board stack-up / 72<sup>nd</sup> electronic components and technology conference (ECTC). IEEE. — San Diego, CA, USA, 2022. P. 2244 – 2248. DOI: 10.1109/ECTC51906.2022.00354
3. Бороздина Е. А. Методы испытания склеивающей прокладки, используемой для изготовления многослойных печатных плат. <http://www.dnevnikaui.ru/images/publications/2023/11/technics/Borozdina.pdf> (дата обращения: 17.05.2024).
4. Шимкин А. А., Сафронов А. М. Контроль качества полимерных связующих и препрегов методом ДСК / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 8. С. 30 – 33.
5. Шимкин А. А., Гребенева Т. А., Меркулова Ю. И. Определение степени отверждения термореактивных связующих методами ИК-спектроскопии и дифференциальной сканирующей калориметрии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 8. С. 27 – 32.
6. Макарова Н. Ю., Евстафьев С. С. Анализ отечественных материалов для производства печатных плат / Науч.-практ. конф. «Интеллектуальные системы и микросистемная техника»: сб. тр. — М.: МИЭТ, 2022. С. 283 – 291.
7. Дубровский А. В., Егоров А. В. Вопросы расширения применения отечественных базовых материалов в изготовлении печатных плат / Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 3(214). С. 160 – 165. DOI: 10.22184/1992-4178.2022.214.3.160.164
8. Мурзин В. С., Нечипоренко Е. В., Котова С. В. и др. Дивинил-стирольные термоэластопласты как основа компози-

- ций / Каучук и резина. 2021. Т. 80. № 1. С. 16 – 19. DOI: 10.47664/0022-9466-2021-80-1-16-19
9. **Jiang J., Lu Z., Shen J., et al.** Decoupling between calorimetric and dynamical glass transitions in high-entropy metallic glasses / *Nature Commun.* 2021. Vol. 12. P. 3843 – 3851. DOI: 10.1038/s41467-021-24093-w
  10. **Хамидуллин О. Л., Мадиярова Г. М., Резвых А. В. и др.** Сравнительный анализ термического расширения и теплоемкости полимеров на основе ряда эпоксиноволачных смол в широком диапазоне температур / *Вестник технологического университета.* 2021. Т. 24. № 5. С. 40 – 44.
  11. **Van Miltenburg J. C., Cuevas-Diarte M. A.** The influence of sample mass, heating rate and heat transfer coefficient on the form of DSC curves / *Thermochim. Acta.* 1989. Vol. 156. P. 291 – 297. DOI: 10.1016/0040-6031(89)87197-7
  12. **Gaisford S.** Fast-scan differential scanning calorimetry / *Eur. Pharm. Rev.* 2008. Vol. 4. P. 83 – 89.
  13. **Gabbott P. V.** *Fast Scanning DSC / Principles and Applications of Thermal Analysis.* — Wiley Blackwell, 2007. DOI: 10.1002/9780470697702.ch2
  14. **Ford J. L., Mann T. E.** Fast-Scan DSC and its role in pharmaceutical physical form characterization and selection / *Advanced Drug Delivery Reviews.* 2012. Vol. 64. P. 422 – 430. DOI: 10.1016/j.addr.2011.12.001
  15. *The handbook of differential scanning calorimetry. Techniques, instrumentation, inorganic and pharmaceutical substances.* — Oxford: Elsevier, 2023. — 853 p. DOI: 10.1016/C2015-0-05607-6
  16. **McGregor C., Bines E.** The use of high-speed differential scanning calorimetry (Hyper-DSC) in the study of pharmaceutical polymorphs / *International Journal of Pharmaceutics.* 2008. Vol. 350. P. 48 – 52. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2007.08.015
  17. **Poel G. V., Mathot V. B. F.** High performance differential scanning calorimetry (HPer DSC): a powerful analytical tool for the study of the metastability of polymers / *Thermochim. Acta.* 2007. Vol. 461. P. 107 – 121. DOI: 10.1016/j.tca.2007.04.009
  18. **Liu P., Yu L., Liu H., et al.** Glass transition temperature of starch studied by a high-speed DSC / *Carbohydrate Polymers.* 2009. Vol. 77. P. 250 – 253. DOI: 10.1016/carbopol.2008.12.027
  4. **Shimkin A. A., Safronov A. M.** Quality control of polymer binders by DSC / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2016. Vol. 82. N 8. P. 30 – 33 [in Russian].
  5. **Shimkin A. A., Grebneva T. A., Merkulova Yu. I.** Determination of degree of cure of thermosetting resins using IR-spectroscopy and differential scanning calorimetry / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2017. Vol. 83. N 8. P. 27 – 32 [in Russian].
  6. **Makarova N. Yu., Evstafev S. S.** Analysis of domestic materials for the production of printed circuit boards / *Research and practice conf. "Intelligent systems and microsystems engineering": coll. of works.* — Moscow: MIET, 2022. P. 283 – 291 [in Russian].
  7. **Dubrovsky A. V., Egorov A. V.** Concideration of expansion of domestic base materials implementation in bare boards production / *Electronics: Science, Technology, Business.* 2022. N 3(214). P. 160 – 165 [in Russian]. DOI: 10.22184/1992-4178.2022.214.3.160.164
  8. **Murzin V. S., Nechiporenko E. V., Kotova S. V., et al.** Styrene-butadiene thermoplastics as the basis of adhesive compositions / *Kauchuk Rez.* 2021. Vol. 80. N 1. P. 16 – 19 [in Russian]. DOI: 10.47664/0022-9466-2021-80-1-16-19
  9. **Jiang J., Lu Z., Shen J., et al.** Decoupling between calorimetric and dynamical glass transitions in high-entropy metallic glasses / *Nature Commun.* 2021. Vol. 12. P. 3843 – 3851. DOI: 10.1038/s41467-021-24093-w
  10. **Khamidullin O. L., Madiyarova G. M., Rezvykh A. V., et al.** Comparative analysis of thermal expansion and thermal capacity of polymers based on a series of epoxy novolak resins in a wide range of temperatures / *Vestn. Tekhnol. Univ.* 2021. Vol. 24. N 5. P. 40 – 44 [in Russian].
  11. **Van Miltenburg J. C., Cuevas-Diarte M. A.** The influence of sample mass, heating rate and heat transfer coefficient on the form of DSC curves / *Thermochim. Acta.* 1989. Vol. 156. P. 291 – 297. DOI: 10.1016/0040-6031(89)87197-7
  12. **Gaisford S.** Fast-scan differential scanning calorimetry / *Eur. Pharm. Rev.* 2008. Vol. 4. P. 83 – 89.
  13. **Gabbott P. V.** *Fast Scanning DSC / Principles and Applications of Thermal Analysis.* — Wiley Blackwell, 2007. DOI: 10.1002/9780470697702.ch2
  14. **Ford J. L., Mann T. E.** Fast-Scan DSC and its role in pharmaceutical physical form characterization and selection / *Advanced Drug Delivery Reviews.* 2012. Vol. 64. P. 422 – 430. DOI: 10.1016/j.addr.2011.12.001
  15. *The handbook of differential scanning calorimetry. Techniques, instrumentation, inorganic and pharmaceutical substances.* — Oxford: Elsevier, 2023. — 853 p. DOI: 10.1016/C2015-0-05607-6
  16. **McGregor C., Bines E.** The use of high-speed differential scanning calorimetry (Hyper-DSC) in the study of pharmaceutical polymorphs / *International Journal of Pharmaceutics.* 2008. Vol. 350. P. 48 – 52. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2007.08.015
  17. **Poel G. V., Mathot V. B. F.** High performance differential scanning calorimetry (HPer DSC): a powerful analytical tool for the study of the metastability of polymers / *Thermochim. Acta.* 2007. Vol. 461. P. 107 – 121. DOI: 10.1016/j.tca.2007.04.009
  18. **Liu P., Yu L., Liu H., et al.** Glass transition temperature of starch studied by a high-speed DSC / *Carbohydrate Polymers.* 2009. Vol. 77. P. 250 – 253. DOI: 10.1016/carbopol.2008.12.027

## REFERENCES