

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-3-38-45>

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ ОТВЕРЖДЕНИЯ ЭПОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НЕФТЕГАЗОПРОВОДНЫХ И НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ, МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ СКАНИРУЮЩЕЙ КАЛОРИМЕТРИИ

© Максим Михайлович Мельников¹, Юлия Вячеславовна Прыкина²,
Юлия Жановна Вагапова^{2*}, Александр Иванович Костев²

¹ Русский НИИ трубной промышленности, Россия, 454139, г. Челябинск, ул. Новороссийская, д. 30.

² Научно-технический центр ТМК, Россия, 121205, Москва, Территория инновационного центра Сколково, ул. Большой бульвар, д. 5; *e-mail: VagapovaYZ@tmk-group.com

*Статья поступила 24 сентября 2022 г. Поступила после доработки 14 ноября 2022 г.
Принята к публикации 25 января 2023 г.*

Использование внутренних защитных покрытий для защиты стальных труб — один из наиболее эффективных и надежных способов борьбы с коррозией. Наибольшее распространение получили покрытия на основе эпоксидных пленкообразующих, обладающие высокой адгезией к стали и химической стойкостью к воздействию различных агрессивных факторов. Формирование эпоксидных покрытий неразрывно связано с взаимодействиями, происходящими на поверхности металла, и физико-химическими свойствами самого полимера и характеризуется процессом отверждения (полимеризации), а также меняющимися в ходе него теплофизическими параметрами (температурой стеклования, степенью отверждения). Для определения температуры стеклования полимера на практике широко применяют метод дифференциальной сканирующей калориметрии, позволяющий регистрировать фазовые переходы и их значения для самых различных материалов. Точность определения параметров зависит от множества факторов, связанных как с возможностями самого прибора, так и с методологическими подходами. Это приводит к отсутствию повторяемости и воспроизводимости результатов испытаний в различных лабораториях и, как следствие, — единых критериев оценки качества защитных покрытий. В работе представлены результаты исследования влияния различных факторов на определение теплофизических свойств эпоксидных покрытий методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Установлено влияние аппаратных условий проведения испытаний, способов пробоподготовки, методов обработки результатов с помощью специализированного программного обеспечения на определение теплофизических свойств эпоксидных покрытий методом дифференциальной сканирующей калориметрии. Полученные результаты могут быть использованы для разработки уточненной процедуры определения степени отверждения лакокрасочных покрытий на основе эпоксидных порошковых красок.

Ключевые слова: дифференциальная сканирующая калориметрия; эпоксидные покрытия; температура стеклования; степень отверждения; теплофизические свойства.

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE DETERMINATION OF THE DEGREE OF CURING EPOXY COATINGS OF OIL AND GAS PIPES BY DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY

© Maksim M. Melnikov¹, Yuliya V. Prykina²,
Yuliya Zh. Vagapova^{2*}, Aleksandr I. Kostev²

¹ The Russian Research Institute of the Pipe Industry (RusNITI), 30, Novorossiyskaya ul., Chelyabinsk, 454139, Russia.

² TMK R&D, 5, Bolshoy bulvar, Territoriya innovatsionnogo tsentra Skolkovo, Moscow, 121205, Russia;

*e-mail: VagapovaYZ@tmk-group.com

Received September 24, 2022. Revised November 14, 2022. Accepted January 25, 2023.

The use of internal protective coating of steel pipes is one of the most effective and reliable ways to prevent corrosion. The most widespread coatings based on epoxy film-forming exhibit high adhesion to steel and chemical resistance to various aggressive factors. The formation of epoxy coatings is intimately connected with the interactions occurring on the metal surface, the physicochemical properties of the polymer itself

and with the process of curing (polymerization), as well as with the thermophysical parameters that change during curing (glass transition temperature, degree of curing). The method of differential scanning calorimetry is widely used in practice to determine glass transition temperature which provide detecting phase transitions and their values in different materials. The accuracy of this method depends on many factors related to the instrument properties and methodological approaches which leads to a lack of repeatability and reproducibility of test results in various laboratories, and as a result, to the absence of a unified criteria for assessing the quality of protective coatings. We present the results of studying the degree of curing the epoxy coatings of oil and gas pipes by differential scanning calorimetry. The effect of instrumental conditions for laboratory tests, sample preparation methods, and methods of data processing by specialized software on the determination of thermophysical properties of epoxy coatings by differential scanning calorimetry was revealed. The results obtained can be used in developing a refined procedure for determining the degree of curing protective coatings.

Keywords: differential scanning calorimetry; epoxy coatings; glass transition temperature; degree of cure; thermophysical properties.

Введение

Коррозионное разрушение внутренней поверхности нефтегазопроводных и насосно-компрессорных труб приводит к серьезным осложнениям при разработке и эксплуатации нефтегазовых месторождений [1, 2]. Один из наиболее распространенных и успешно применяемых способов защиты стальных труб от коррозии — нанесение защитных покрытий на основе жидких или порошковых эпоксидных лакокрасочных материалов [3, 4]. Для оценки свойств и формирования показателей защитных покрытий испытательные лаборатории применяют как стандартные, так и вновь разрабатываемые методики испытаний.

Полнота полимеризации — один из основных показателей сформированного эпоксидного покрытия. Она характеризуется значением степени отверждения и определяет его физико-механические и защитные свойства [5, 6]. Полимеризация неразрывно связана с процессами, происходящими на поверхности металла, и физико-химическими свойствами полимерного материала. При формировании покрытия на основе эпоксидных порошковых лакокрасочных материалов (ЛКМ) полимеризация проходит несколько стадий: сначала полимер переходит в вязкотекучее состояние, затем частицы порошка сплавляются, образуя монолитный слой, одновременно со сплавлением происходит смачивание покрываемой поверхности и растекание расплава полимера [7 – 10].

Для определения степени отверждения покрытия (ΔT_g) на основе эпоксидного порошкового ЛКМ широко применяют метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), при котором определяется разность температур стеклования (ΔT_g), полученных при последовательных термических сканированиях (циклах нагрева) [11, 12]. Значение температуры стеклования зависит как от свойств исследуемого материала, так и метода и условий проведения испытания. В связи с этим при определении степени отверж-

дения покрытия в разных лабораториях наблюдается отсутствие повторяемости и воспроизводимости результатов испытаний [13 – 16].

Цель работы — определение основных факторов, влияющих на сходимость результатов при определении степени отверждения лакокрасочного покрытия на основе эпоксидной порошковой краски методом ДСК.

Материалы, методика, оборудование

На сегодняшний день общие принципы и процедура определения температуры стеклования и степени отверждения покрытия приведены в следующих нормативных документах:

ISO 11357-1, ГОСТ Р 55134 — описывают ряд общих аспектов ДСК, таких как принцип работы прибора и его оснащение, отбор проб, калибровка;

ISO 11357-2, ГОСТ Р 55135 — устанавливают методы определения значения температуры стеклования;

CSA Z245.20, ISO 21809-2, ГОСТ Р ИСО 21809-2, NACE SP0394 — содержат процедуру определения степени отверждения покрытия.

Для определения основных факторов, влияющих на значение степени отверждения эпоксидного покрытия, проанализированы методологические подходы в указанных стандартах, разработана программа лабораторных испытаний, позволяющая оценить влияние:

скорости охлаждения и нагрева, ограниченной оснащением прибора;

типа инертного газа;

пробоподготовки, процедуры отбора проб и их расположения в тигле;

изотермической выдержки в предварительном цикле нагрева;

температуры «начала деградации» покрытия — точки D (температуры, при которой полимер начинает гореть и интенсивно терять массу);

процедуры обработки полученных результатов.

Перечисленные факторы были разделены на три основные группы:

- способы пробоподготовки;
- условия испытания по температурной программе;
- методы обработки результатов (кривых ДСК).

Для проведения исследований были подготовлены образцы — стальные пластины размером 100×100 мм — с покрытием на основе порошковой эпоксидной краски марки П-ЭП-585. Подготовка поверхности соответствовала требованиям производителя ЛКМ.

Поскольку расчетное значение степени отверждения (ΔT_g) определяется как разность температур стеклования, полученных при последовательных термических циклах нагрева, а температура стеклования сформированного покрытия зависит от фактического режима его полимеризации, для испытаний были подготовлены образцы с разными режимами отверждения покрытия.

Отверждение покрытия проводили по следующим температурным режимам:

при температуре ниже рекомендованной производителем ЛКМ (недоотверждение) — 140°C в течение 20 мин (140/20);

при температуре, рекомендованной производителем ЛКМ (отверждение) — 180°C в течение 20 мин (180/20);

при температуре выше рекомендованной производителем ЛКМ (переотверждение) — 220°C в течение 20 мин (220/20).

Измерения проводили с помощью дифференциального сканирующего калориметра DSC 200 F3 Maia (NETZSCH), обработку кривых ДСК — с использованием программного обеспечения NETZSCH Proteus — Термический анализ Version 5.2.1 (NETZSCH).

Работу проводили следующим образом.

Для определения степени отверждения покрытия была выбрана температурная программа по CSA Z245.20. Согласно ей, перед определением степени отверждения покрытия по основной температурной программе необходимо определить исходные теплофизические характеристики покрытия. Предварительный анализ проводят путем нагрева образца при температуре от 25 до 285°C . Для исследуемого покрытия П-ЭП-585 ориентировочная температура стеклования T_g составила 114°C , температура «начала деградации» ($D - 275$) $^\circ\text{C}$.

Измерение степени отверждения покрытия. Отбор пробы пленки покрытия проводили при температуре 20°C , при этом исключались воздействия, приводящие к нагреванию образца. Отобранную пробу размещали в алюминиевом тигле с плоским дном в виде нескольких фрагментов.

При измерениях в качестве продувочного газа использовали аргон (расход — 100 мл/мин, скорость нагрева/охлаждения — $20^\circ\text{C}/\text{мин}$). Измерения проводили по следующей температурной программе:

предварительный нагрев измерительной ячейки прибора до температуры $A = (T_g - 40)^\circ\text{C}$ с одновременной продувкой аргоном в течение 5 мин;

1-й нагрев до температуры $B = (T_g + 10)^\circ\text{C}$ с последующей изотермической выдержкой в течение 2 мин;

охлаждение до температуры A с последующей изотермической выдержкой в течение 5 мин;

2-й нагрев до температуры «начала деградации» $D = 275^\circ\text{C}$;

охлаждение до температуры A с последующей изотермической выдержкой в течение 5 мин;

3-й нагрев до температуры $(T_g + 50)^\circ\text{C}$;

охлаждение до температуры окружающей среды.

Обработка результатов измерений. Результаты обрабатывали методом точки перегиба (ISO 11357-2, ГОСТ Р 55135). Степень отверждения покрытия рассчитывали как разницу температур стеклования, полученных в 3-м и 2-м нагревах ($\Delta T_g = T_{g3} - T_{g2}$).

Проверку точности полученных значений степени отверждения покрытия проводили на основе комплекса исследований по каждой группе следующих факторов (способ пробоподготовки образцов):

отбор проб при температуре 20°C одним или несколькими фрагментами пленки или соскоб поверхностного слоя покрытия;

отбор проб одним фрагментом при температуре минус 30°C и их расположение внутренней или внешней стороной к тиглю.

Условия проведения испытаний, влияющие на результаты измерений, приведены в табл. 1.

При исследовании каждого фактора было проведено три параллельных измерения степени отверждения покрытия. За итоговый результат принимали среднеарифметическое значение.

Обсуждение результатов

На образцах для исследований была определена степень отверждения покрытия по программе испытаний, приведенной в табл. 1. Результаты испытаний, полученные по основной температурной программе, представлены на рис. 1.

Получены следующие значения степени отверждения покрытия ΔT_g при определении температуры стеклования методом перегиба, $^\circ\text{C}$: режим 140/20 (недоотверждение) — $10,3$, режим 180/20 (отверждение) — $1,4$, режим 220/20 (переотверждение) — $0,03$.

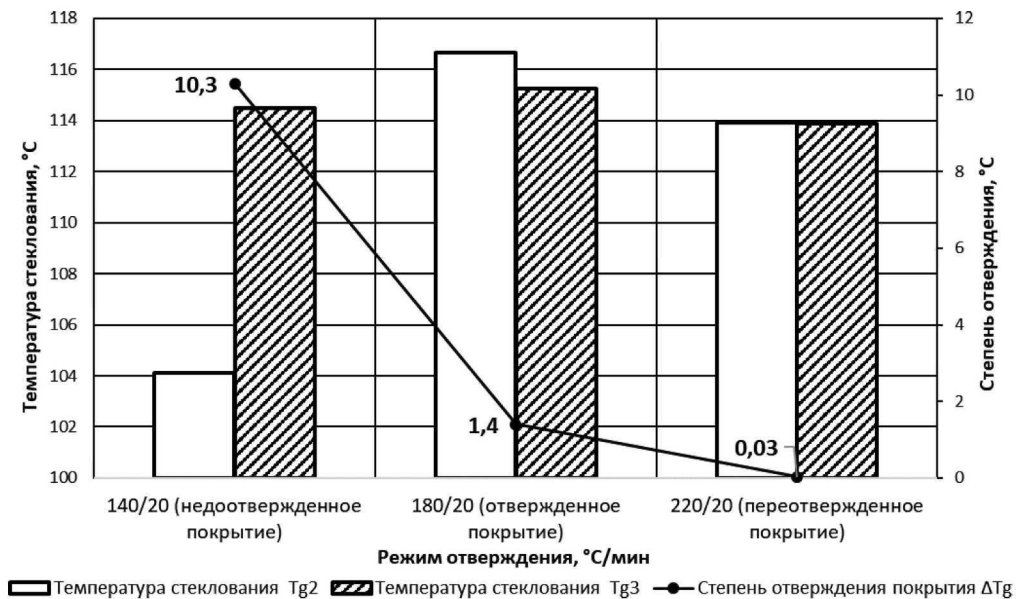


Рис. 1. Результаты испытаний по основной температурной программе

Fig. 1. Test results for the main temperature program

Значение степени отверждения, полученное для «недоотвержденного» покрытия (режим 140/20), может быть связано с тем, что в процессе полимеризации покрытия при его недоотверждении образуются связанные между собой надмолекулярные структуры (глобулы), формирующие структуру, не обладающую сильным взаимодействием и прочностью. Это приводит к изменению свойств при малых физических воздействиях на покрытие [17 – 19].

Для «отвержденного» и «переотвержденного» типов покрытия отмечено увеличение ориентировочной температуры стеклования T_g , что может быть связано с ростом количества глобул при повышении температуры и увеличении времени формирования покрытия [20, 21].

Оценка влияния аппаратурных факторов и температурной программы на значение степени отверждения покрытия. Суммарно было проведено около 70 испытаний, оценивающих воздействие 23 факторов на значения температу-

Таблица 1. Условия испытаний, исследуемые в температурных программах

Table 1. Test conditions used in temperature programs

№ п/п	Условия проведения испытаний	Изменяемый параметр
1	Скорость охлаждения	10 °C/мин 15 °C/мин 20 °C/мин
2	Тип продувочного газа	Азот (100 мл/мин) Аргон (100 мл/мин)
3	Температура начала измерения A (по CSA Z245.20)	($T_g - 40$) °C ($T_g - 50$) °C
4	Продолжительность изотермической выдержки при температуре B (CSA Z245.20) в первом цикле нагрева	2 мин 5 мин
5	Продолжительность изотермической выдержки при температуре начала измерения A (CSA Z245.20)	5 мин при A = ($T_g - 40$) °C только перед первым нагревом 5 мин при A = ($T_g - 40$) °C перед каждым нагревом 5 мин при A = ($T_g - 50$) °C перед каждым нагревом
6	Температура «начала деградации» D (CSA Z245.20)	D = (275 + 10) °C D = 275 °C D = (275 - 10) °C

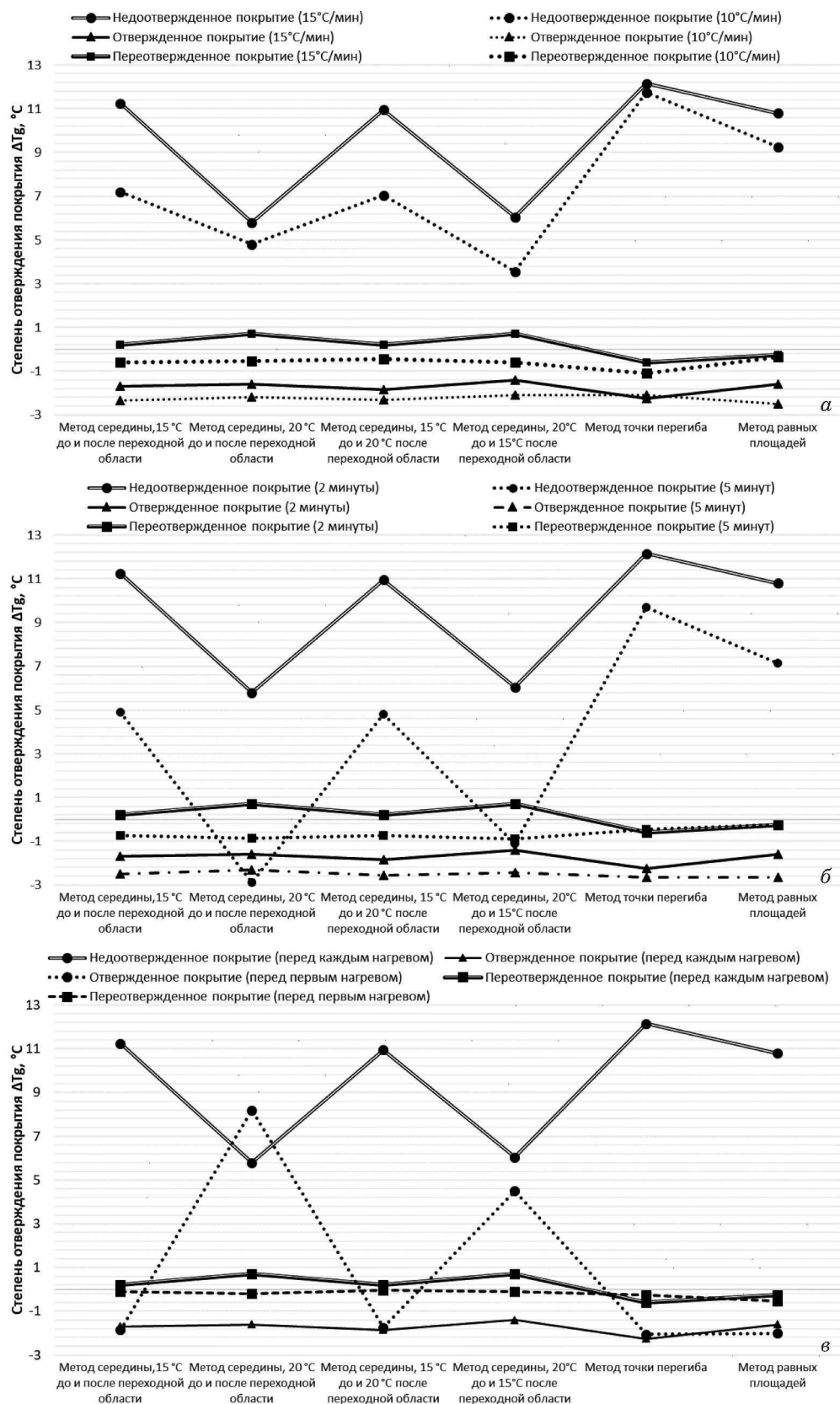


Рис. 2. Степень отверждения ΔT_g покрытия при скорости охлаждения 10 и 15 °C/мин (а), изотермической выдержке при температуре B при 1-м нагреве 2 и 5 мин (б), изотермической выдержке при температуре $A = (T_g - 40)$ °C перед каждым или 1-м нагревом (в)

Fig. 2. The degree of curing coating ΔT_g at a cooling rate of 10 and 15 °C/min (a), isothermal exposure at a temperature B in the 1st heating for 2 and 5 min (b), isothermal exposure at a temperature $A = (T_g - 40)$ °C before each or 1st heating (c)

ры стеклования и степени отверждения. Установлено, что значимые различия достигаются при:

изменении скорости охлаждения;
длительности изотермической выдержки при температуре B при первом нагреве;

наличии изотермической выдержки при температуре A перед первым или каждым нагревом.

На рис. 2 приведена зависимость ΔT_g от изменений условий проведения испытаний, касающихся аппаратурных факторов и температурных режимов.

Анализ результатов влияния аппаратурных факторов и температурной программы на значение степени отверждения покрытия. Испытания по определению степени отверждения покрытия методом ДСК показали, что на температуру стеклования и, как следствие, степень отверждения не влияют:

1) условия отбора проб и расположение образцов в тигле;

отбор пробы покрытия одним фрагментом при 20 или минус 30 °С;

отбор пробы с расположением внешней или внутренней стороной к тиглю; отбор пробы способом соскоба или на всю толщину пленки;

2) тип продувочного газа;

3) условия испытаний по температурной программе:

изотермическая выдержка в течение 5 мин перед каждым нагревом при температуре начала измерения $A = (T_g - 40)$ или $A = (T_g - 50)$ °С;

нагрев до температуры «начала деградации» $D = 275$, $(275 - 10)$ или $(275 + 10)$ °С.

На значение степени отверждения покрытия установлено влияние следующих факторов:

1) скорость охлаждения в процессе измерения (при снижении скорости охлаждения с 20 до 10 °С/мин расхождения в значениях степени отверждения для разных типов покрытия составили от 0,9 до 4,2 °С (см. рис. 2));

2) время изотермической выдержки при температуре B при 1-м нагреве (при изменении вы-

держки с 2 до 5 мин расхождения в значениях степени отверждения для разных типов покрытия составили от 1,1 до 8,7 °С);

3) наличие изотермической выдержки при температуре начала измерения $A = (T_g - 40)$ °С перед 1-м или каждым нагревом.

Оценка влияния методов обработки кривых ДСК на воспроизводимость результатов. Задача любой методики — повторяемость и воспроизводимость результатов испытаний. Если повторяемость достигается путем соблюдения процедуры испытаний, то воспроизводимость зависит как от точности средств измерений, так и процедуры обработки полученных результатов. Метод обработки кривых ДСК применяется для определения значения температуры стеклования, необходимой для определения степени отверждения покрытия.

Для выбора метода обработки кривых ДСК, обеспечивающего наибольшую воспроизводимость результатов, были рассчитаны и проанализированы расхождения между значениями температуры стеклования при параллельных измерениях. Используемые методы обработки и значения предельных расхождений приведены в табл. 2.

Анализ влияния методов обработки кривых ДСК на воспроизводимость результатов. При обработке кривых ДСК было установлено, что метод обработки влияет на значение температуры стеклования и, как следствие, на значение степени отверждения покрытия.

В зависимости от метода определения температуры стеклования (ISO 11357-2, ГОСТ Р 55135, CSA Z245.20) получаются разные значения степени отверждения покрытия.

Наибольшая воспроизводимость результатов между параллельными измерениями наблюдается при определении температуры стеклования методом «равных площадей» (по ISO 11357-2).

Наименьшая воспроизводимость результатов между параллельными измерениями наблюдает-

Таблица 2. Расхождения между температурами стеклования при параллельных измерениях для разных методов обработки кривых ДСК

Table 2. Discrepancies between glass transition temperatures determined using different methods of processing DSC curves

Метод обработки кривых ДСК	Расхождения между температурами стеклования при использовании различных методов, °С		
	Недоотвержденное покрытие	Отвержденное покрытие	Переотвержденное покрытие
Метод «середины», 15 °С до и после переходной области	2,7	0,8	0,9
Метод «середины», 20 °С до и после переходной области	13,1	1,1	1,1
Метод «середины», 15 до и 20 °С после переходной области	2,5	2,8	0,7
Метод «середины», 20 до и 15 °С после переходной области	8,3	2,6	1,3
Метод точки перегиба	2,2	1,8	0,9
Метод равных площадей	0,7	1,0	0,9

ся при определении температуры стеклования методом «середины» (CSA Z245.20) с установкой предельной температуры в диапазоне:

20 °C до и после переходной области;

20 до и 15 °C после переходной области.

Заключение

По результатам проведенной работы было установлено, что на значение степени отверждения покрытия ΔT_g оказывают влияние как аппаратные факторы, так и температурная программа испытаний. К ним относят: скорости охлаждения и нагрева, которые в процессе одного измерения должны быть одинаковыми; продолжительность изотермической выдержки в точке B при первом нагреве по CSA Z245.20; наличие изотермической выдержки при температуре начала измерения $A = (T_g - 40)^\circ\text{C}$ перед первым или каждым нагревом.

Немаловажное значение имеют и методы определения температуры стеклования T_g (методы обработки кривых ДСК). Наибольшая сходимость результатов для всех типов покрытий получена при определении T_g методом «равных площадей» по ISO 11357-2, наименьшая — методом «середины» по CSA Z245.20.

Для решения данной актуальной проблемы, а также обеспечения единства измерений, повторяемости и воспроизводимости результатов испытаний необходимо разработать уточненную методику определения степени отверждения покрытия с учетом влияния проанализированных факторов и провести межлабораторные сравнительные испытания.

ЛИТЕРАТУРА

- Карлыханов Н. В., Румянцева А. В. Защитные покрытия трубопроводов: опыт и перспективы использования / XIV международная науч.-практ. конф. «Система управления экологической безопасностью»: сб. тр. — Екатеринбург, 2020. С. 258 – 263.
- Мирсаяпова Р. И., Кантемиров И. Ф. Рассмотрение возможности применения заводского эпоксидного покрытия труб для магистральных и промысловых трубопроводов в различных условиях / Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2020. № 5 – 6. С. 46 – 50. DOI: 10.24411/0131-4270-2020-6-46-50
- Абакачева Е. М., Сафронов Е. Ф., Киреев К. А. и др. Исследование защитных антикоррозионных покрытий магистральных трубопроводов бесконтактным методом / Башкирский химический журнал. 2009. Т. 16. № 4. С. 167 – 172.
- Zargarneshad H., Asselin E., Wong D., et al. A critical review of the time-dependent performance of polymeric pipeline coatings: focus on hydration of epoxy-based coatings / Polymers. 2021. N 13(9). P. 1517. DOI: 10.3390/polym13091517
- Антюфеева Н. В., Алексашин В. М., Столянков Ю. В. Определение степени отверждения ПКМ методами термического анализа / Авиационные материалы и технологии. 2015. № 3. С. 79 – 83. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-79-83
- Kochetov A., Minakov V., Menshchikov E., et al. Process optimization of applying heat and wear proof coating to machine elements in complex acoustic field / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. V. 403. XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. 2019. P. 012091. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012091
- Гаврилова В. А., Кашапов Н. Ф. Коронный разряд для полимерно-порошковых покрытий / Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 7. С. 117 – 125.
- Hung M., Alfantazi A. On the role of water, temperature, and glass transition in the corrosion protection behavior of epoxy coatings for underground pipelines / Journal of Coatings Technology and Research. 2015. Vol. 12(6). P. 1095 – 1110. DOI: 10.1007/s11998-015-9705-0
- Ijaola A., Farayibi P., Asmatulu E. Superhydrophobic coatings for steel pipeline protection in oil and gas industries: A comprehensive review / Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2020. N 83. P. 103544. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103544
- Кузнецова В. А., Деев И. С., Кузнецов Г. В. и др. Влияние наполнителя на усталостную прочность и микроструктуру свободных полимерных пленок покрытий при циклическом растяжении / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 5. С. 35 – 39.
- Gherlone L., Rossini T., Stula V. Powder coatings and differential scanning calorimetry: the perfect fit / Progress in Organic Chemistry. 1998. N 34. P. 57 – 63. DOI: 10.1016/S0300-9440(98)00039-3
- García-Manrique J., Mari B., Ribes-Greus A., et al. Study of the degree of cure through thermal analysis and Raman spectroscopy in composite-forming processes / Materials. 2019. N 12(23). P. 3991. DOI: 10.3390/ma12233991
- Samimi A., Zarinabadi S. An analysis of polyethylene coating corrosion in oil and gas pipelines / Journal of American Science. 2011. N 7(1). P. 1032 – 1036.
- Achillas Dimitris S., Karabela Maria M., Varkopoulou Eleni A., et al. Cure Kinetics Study of Two Epoxy Systems with Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) / Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry. 2012. N 49. P. 630 – 638. DOI: 10.1080/10601325.2012.696995
- Mafi R., Mirabedini S., Attar M., Moradian S. Cure characterization of epoxy and polyester clear powder coatings using differential scanning calorimetry (DSC) and dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) / Progress in Organic Coatings. 2005. Vol. 54. N 3. P. 164 – 169. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2005.06.006
- 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.
- Литвинов В. Б., Токсанбаев М. С., Деев И. С. и др. Кинетика отверждения эпоксидных связующих и микроструктура полимерных матриц в углепластиках на их основе / Материаловедение. 2011. № 7. С. 49 – 67.
- Сухарева Л. А., Воронков В. А., Зубов П. И. Исследование механизма формирования надмолекулярных структур в эпоксидных покрытиях / Высокомолекулярные соединения. 1969. Т. (A)XI. С. 407 – 412.
- Weldon D. Failure analysis and degree of cure / Journal of protective coatings & linings. 2005. Vol. 22. P. 48 – 55.
- Осипчик В. С., Олихова Ю. В., Нгуен Л. Х. и др. Определение температуры стеклования эпокси-силоксановой композиции термическими методами анализа / Пластические массы. 2017. № 7 – 8. С. 34 – 37. DOI: 10.35164/0554-2901-2017-7-8-34-37
- Zhou W., Edmondson S., Jeffers T. Effects of application temperature, degree of cure and film thickness on cathodic disbondment of conventional and new generation FBE coating / NACE Corrosion Conference & Expo. NACE International. — San Diego, CA, USA. 2006. P. 06049.

REFERENCES

1. **Karlykhanov N. V., Rumyantseva A. V.** Protective coatings for pipelines: experience and prospects for use / XIV Int. Sci.-Pract. Conf. "Environmental Safety Management System": coll. of works. — Yekaterinburg, 2020. P. 258 – 263 [in Russian].
2. **Mirsayapova R. I., Kantemirov I. F.** Consideration of application of using epoxy isolation of pipes for trunk and field pipelines in various conditions / *Transp. Khran. Nefteprod. Uglevod. Syr'ya*. 2020. N 5 – 6. P. 46 – 50 [in Russian]. DOI: 10.24411/0131-4270-2020-6-46-50
3. **Abakacheva E. M., Safronov E. F., Kireev K. A., et al.** Research of protective corrosion resistant coatings of main pipelines by noncontact inspection method / *Bashkir. Khim. Zh.* 2009. Vol. 16. N 4. P. 167 – 172 [in Russian].
4. **Zargarnezhad H., Asselin E., Wong D., et al.** A critical review of the time-dependent performance of polymeric pipeline coatings: focus on hydration of epoxy-based coatings / *Polymers*. 2021. N 13(9). P. 1517. DOI: 10.3390/polym13091517
5. **Antyufeeva N. V., Aleksashin V. M., Stolyankov Yu. V.** Polymer composite curing degree evaluation by thermal analysis test methods / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2015. N 3. P. 79 – 83 [in Russian]. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-79-83
6. **Kochetov A., Minakov V., Menshchikov E., et al.** Process optimization of applying heat and wear proof coating to machine elements in complex acoustic field / *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. V. 403. XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. 2019. P. 012091. DOI: 10.1088/1755-1315/403/1/012091
7. **Gavrilova V. A., Kashapov N. F.** Corona discharge for polymer powder coatings / *Vestn. Kazan. Tekhnol. Univ.* 2010. N 7. P. 117 – 125 [in Russian].
8. **Hung M., Alfantazi A.** On the role of water, temperature, and glass transition in the corrosion protection behavior of epoxy coatings for underground pipelines / *Journal of Coatings Technology and Research*. 2015. Vol. 12(6). P. 1095 – 1110. DOI: 10.1007/s11998-015-9705-0
9. **Ijaola A., Farayibi P., Asmatulu E.** Superhydrophobic coatings for steel pipeline protection in oil and gas industries: A comprehensive review / *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2020. N 83. P. 103544. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103544
10. **Kuznetsova V. A., Deev I. S., Kuznetsov G. V., et al.** The effect of filler on the fatigue strength coefficient and microstructure of free-filled polymer film coatings under cyclic tension / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2014. Vol. 80. N 5. P. 35 – 39 [in Russian].
11. **Gherlone L., Rossini T., Stula V.** Powder coatings and differential scanning calorimetry: the perfect fit / *Progress in Organic Chemistry*. 1998. N 34. P. 57 – 63. DOI: 10.1016/S0300-9440(98)00039-3
12. **García-Manrique J., Marí B., Ribes-Greus A., et al.** Study of the degree of cure through thermal analysis and Raman spectroscopy in composite-forming processes / *Materials*. 2019. N 12(23). P. 3991. DOI: 10.3390/ma12233991
13. **Samimi A., Zarinabadi S.** An analysis of polyethylene coating corrosion in oil and gas pipelines / *Journal of American Science*. 2011. N 7(1). P. 1032 – 1036.
14. **Achillas Dimitris S., Karabela Maria M., Varkopoulou Eleni A., et al.** Cure Kinetics Study of Two Epoxy Systems with Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) / *Journal of Macromolecular Science. Part A: Pure and Applied Chemistry*. 2012. N 49. P. 630 – 638. DOI: 10.1080/10601325.2012.696995
15. **Mafi R., Mirabedini S., Attar M., Moradian S.** Cure characterization of epoxy and polyester clear powder coatings using differential scanning calorimetry (DSC) and dynamic mechanical thermal analysis (DMTA) / *Progress in Organic Coatings*. 2005. Vol. 54. N 3. P. 164 – 169. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2005.06.006
16. **Shimkin A. A., Safronov A. M.** Quality control of polymeric binders and prepreps by DSC method / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2016. Vol. 82. N 8. P. 30 – 33 [in Russian].
17. **Litvinov V. B., Toksanbaev M. S., Deev I. S., et al.** Kinetics of epoxy binders curing and microstructure of polymer matrices in carbon fiber reinforced plastics based on them / *Materialovedenie*. 2011. N 7. P. 49 – 67 [in Russian].
18. **Sukhareva L. A., Voronkov V. A., Zubov P. I.** Investigation of the supramolecular structures formation mechanism in epoxy coatings / *Vysokomol. Soed.* 1969. Vol. (A)XI. P. 407 – 412 [in Russian].
19. **Weldon D.** Failure analysis and degree of cure / *Journal of protective coatings & linings*. 2005. Vol. 22. P. 48 – 55.
20. **Osipchik V. S., Olikhova Yu. V., Nguen L. H., et al.** Evaluation of glass temperature of epoxy-siloxane composition by thermal analysis / *Plasticheskie massy*. 2017. N 7 – 8. P. 34 – 37 [in Russian]. DOI: 10.35164/0554-2901-2017-7-8-34-37
21. **Zhou W., Edmondson S., Jeffers T.** Effects of application temperature, degree of cure and film thickness on cathodic disbondment of conventional and new generation FBE coating / *NACE Corrosion Conference & Expo. NACE International*. — San Diego, CA, USA. 2006. P. 06049.