

УДК 665.6.7

DOI: 10.30987/article\_5ce675a1454d87.89327052

**П.Е. Юдин**, к.т.н.,

**Н.А. Баранов**, аспирант,

**А.Н. Тараторин**, магистрант

(ООО «Научно-производственный центр «Самара», 443022, г. Самара, Гаражный проезд, 3, литера Е)

**Ю.М. Марков**, к.т.н.

(ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

E-mail: yori.markov.uljnov.1697@yandex.ru;

yudin@npcsamara.ru; baranov@npcsamara.ru

## **Перспективы повышения ресурса внутренних антикоррозионных покрытий труб нефтяного сортамента при помощи воздействия СВЧ-радиоизлучения**

*Представлен обзор путей повышения эксплуатационной надежности труб с внутренними полимерными антикоррозионными покрытиями. Сделан вывод, что наиболее перспективным можно считать метод нетепловой модификации покрытий электромагнитными полями СВЧ, поскольку наблюдается рост физико-механических свойств покрытия при снижении энергозатрат. При этом требуется лишь незначительная доработка производственной линии.*

**Ключевые слова:** внутритрубные антикоррозионные покрытия; нефтепроводные трубы; качество; ресурс; молекулярная структура полимеров; полимеризация; нетепловая микроволновая обработка; расчет энергоэкономичности.

**P.E. Yudin**, Can. Sc. Tech.,

**N.A. Baranov**, Post graduate student,

**A.N. Taratorin**, Master degree student

(PC "Scientific-Production Center "Samara", E, 3, Garazhny Passage, Samara, 443022)

**Yu.M. Markov**, Can. Sc. Tech.

(FSBEI HVE "Samara State Technical University", 244, Molodogvardeyskaya Str., Samara, 443100)

## **Prospects for life increase for internal antirust coatings in pipes of oil assortment using SHF-radio-radiation impact**

*A review of ways for the operation increase of pipes with inner polymer antirust coatings is presented. A conclusion is drawn that the most promising method is a method of a non-thermal modification of coatings with SHF electromagnetic fields as one observes the increase of coating physical-mechanical properties at power consumption decrease. At that a small updating of a production line is required.*

**Keywords:** inner-pipe antirust coatings; oil-pipes; quality; life; polymer molecular structure; polymerization; non-thermal microwave processing; energy-conservation computation.

### **Введение**

В настоящее время нефтяные добывающие общества (ДО) все шире применяют внутрен-

ние антикоррозионные покрытия (ВАКП), поскольку это наиболее эффективный метод защиты от коррозии [1, 2]. Нароботка труб с ВАКП уже превышает 7–10 лет на тех место-

рождениях, где традиционные трубные стали без покрытия работали не более 2–3 лет. Данная тенденция не случайна и связана с целым рядом факторов, приводящих к росту качества поставляемой продукции, и, как следствие, увеличению срока службы трубопроводов. К таким факторам относятся:

- выбор оптимальных технологий нанесения антикоррозионных покрытий;
- внедрение заводами-изготовителями лакокрасочных покрытий (ЛКП) наиболее удачных рецептур;
- внедрение многими ДО инспекционного контроля на заводах-изготовителях;
- освоение испытательными центрами достоверных методов контроля.

Опираясь на накопленную статистику из рабочей экспертной практики, авторы считают, что наиболее распространенной причиной дефектов, приводящих к преждевременным отказам труб с ВАКП, является недополимеризация покрытия. Как известно, механическая прочность, барьерные свойства и температурный диапазон эксплуатации покрытия являются производными именно от степени его отверждения.

Высокая распространенность недополимеризации покрытий связана с тем, что не все производители внедряют достоверные методы контроля данного параметра. Для материалов горячего отверждения на основе порошков таким методом можно считать определение  $\Delta T_g$  методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). При этом для покрытий холодного отверждения, на основе жидких пленкообразующих, такой метод отсутствует.

В последние годы наблюдается значительный рост барьерных свойств покрытий классических брендов. Производители известных торговых названий ЛКП не стоят на месте, постоянно совершенствуя свои рецептуры. Наиболее распространенное покрытие внутренней поверхности труб ПЭП 585 имеет температуру стеклования  $\sim 110$  °С и успешно проходит самые жесткие автоклавные тесты при температуре 80 °С, что позволяет применять данный материал практически на всех промышленных трубопроводах, включая водоводы высокого давления.

Сегодня также наблюдается резкий скачок в качестве проводимых лабораториями испытаний. Координатором данного процесса является АО «РосНИТИ», поскольку на его базе была завершена работа по разработке ГОСТ Р 58346-2019 «Трубы и соединительные детали

стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности. Общие технические условия». Внедрение современных методов контроля позволяет не только оценить качество ВАКП, но и спрогнозировать ресурс покрытий в конкретных условиях эксплуатации [3 – 5].

Несмотря на это, можно прогнозировать стагнацию повышения качества трубной продукции с ВАКП при использовании лишь классических и традиционных технологий изготовления труб. Наряду с совершенствованием рецептур и технологий нанесения, актуальным направлением исследований является поиск и апробация методов модификации традиционных материалов покрытий.

На сегодняшний день наиболее перспективными являются методы физической модификации покрытий в процессе их нанесения. Это звуковые и ультразвуковые колебания, виброобработка, воздействие токов высокой частоты, обработка пучком электронов, лазерное и ультрафиолетовое излучение. Постоянный поиск альтернативных технологий связан с тем, что традиционные процессы многостадийны, энерго- и трудозатратны, влекут ухудшение экологической обстановки. Из всех типов физической модификации наибольший интерес представляет нетепловое воздействие электромагнитным полем сверхвысокочастотного радиодиапазона (СВЧ ЭМП), описанное в работах [6 – 9] и др.

В работах [6] и [8] показано, что нетепловое воздействие СВЧ ЭМП на эпоксидный компаунд в процессе его отверждения увеличивает его прочность в 3–4 раза, теплостойкость в 1,4–1,6 раза и интенсифицирует процесс отверждения компаунда в десятки раз (в 5–70 раз для разных режимов СВЧ-обработки). В работе [9] установлено, что при незначительном увеличении себестоимости модифицирующей обработки наблюдается рост физико-механических свойств реактопластов на 20...30 %. Технология промышленной модификации микроволновой обработкой наружных изоляционных покрытий уже получила промышленное внедрение [7], что свидетельствует о ее эффективности.

Ожидаемое после СВЧ-воздействия изменение физико-механических свойств обусловлено самой молекулярной и надмолекулярной структурой полимеров и потенциальными возможностями их преобразования. Образование макромолекул зависит от химического состава, числа атомов и их размеров, групп на концах цепей, катализаторов, давления, темпе-

ратуры, среды синтеза и других условий.

Чем сложнее химическое строение макромолекул и разнообразнее условия синтеза (состав сырья, рецептура и технологические режимы), тем более сложные и разнообразные получаются надмолекулярные структуры и их свойства. Поэтому надмолекулярная структура одного и того же полимера может различаться для разных производственных партий, которая определяет физико-механические свойства, механизм и скорость физико-химических и химических процессов при производстве конечных изделий.

Различия в надмолекулярных структурах заметно влияют на физические свойства полимера, не определяемые одним лишь его химическим строением. Направленное изменение надмолекулярных структур, достигаемое температурными, механическими и другими воздействиями, существенно влияет на комплекс свойств полимерного тела и широко применяется в промышленности.

#### Оборудование для проведения экспериментов и методика исследования

Для осуществления экспериментов в ООО «НПЦ «Самара» была сконструирована и использована лабораторная установка для модификации порошковых эпоксидных красок излучением СВЧ-диапазона. Установка представляет собой камеру на базе стандартной бытовой микроволновой печи; мощность излучения – 900 Вт; частота излучения – 2450 МГц ± 50кГц.

На первом этапе исследовалось влияние СВЧ-воздействия на уже полимеризованные покрытия, нанесенные на металлические подложки:

- 1) жидкое антикоррозионное покрытие MPLAG 96 на эпоксидной основе;
- 2) жидкое антикоррозионное покрытие ТРЭПП ТР 90 на эпоксидной основе;
- 3) порошковое антикоррозионное покрытие ПЭП 585.

На втором этапе исследования была использована порошковая эпоксидная краска PrimaTek InnoPipe 67 производства ООО НПЦ «Приматек». Лабораторные эксперименты по исследованию СВЧ-воздействия на данное порошковое покрытие включали в себя подготовку поверхности металлических пластин к нанесению, предварительный нагрев пластин в печи до заданной температуры, нанесение порошкового ЛКМ на пластины методом электростатического напыления; термическую

полимеризацию покрытия в печи при одно-временной обработке СВЧ, охлаждение образцов с покрытием, измерение выбранных параметров покрытия, после чего полученные результаты обрабатывались и интерпретировались.

В качестве основных характеристик антикоррозионных покрытий, которые, с одной стороны описывают эксплуатационные свойства покрытий, а с другой могут изменяться в процессе различных физико-химических воздействий были выбраны следующие характеристики:

– температура стеклования ( $T_g$ ), при которой некристаллизующееся вещество переходит в стеклообразное, псевдокристаллическое состояние, становясь твёрдым. Характеризует температурный диапазон эксплуатации покрытия. Для нефтепромысловых коммуникаций  $T_g$  покрытий как правило на 20...30 °С выше температуры эксплуатации. Определяется данный параметр методом ДСК. Разница между  $T_g$  при третьем и втором нагреве ( $\Delta T_g$ ) – параметр, который для порошковых антикоррозионных покрытий характеризует степень полимеризации. Степень полимеризации в виде процентного содержания отвержденной полимеризованной фазы в объеме полимера методом ДСК не определяется. Этот метод позволяет лишь определить годно покрытие к эксплуатации по параметру степени отверждения или не годно, в зависимости от того меньше или больше значение  $\Delta T_g$  определенного порогового значения;

– адгезия покрытия к металлу подложки  $\sigma_{адг}$ ;

– твёрдость методом вдавливания по Бухгольцу;

– эластичность покрытия;

– предел прочности на разрыв  $\sigma_{разр}$  и относительное удлинение  $\delta$  свободных пленок покрытия.

#### Испытания образцов, облученных после окончательной полимеризации покрытия

Результаты определения  $T_g$  и  $\Delta T_g$  образцов покрытий представлены в табл. 1. Анализу подвергались образцы в исходном состоянии (маркировка 1, 2 и 3), после воздействия СВЧ в течение 3 мин без балластной нагрузки (маркировка 1–3, 2–3 и 3–3) и после воздействия СВЧ в течение 3 мин с балластной нагрузкой (вода) (индексы 1–3В, 2–3В и 3–3В). Номера 1, 2 и 3 обозначены все вышеуказанные марки покрытий.

1. Результаты определения  $T_g$  и  $\Delta T_g$  образцов

Образец	$T_g$ , °C Второй нагрев	$T_g$ , °C Третий нагрев	$\Delta T_g$ , °C
1	103,39	130,46	27,07
1-3	101,68	130,85	29,17
1-3В	101,87	127,08	25,21
2	59,75	86,91	27,16
2-3	60,54	86,95	26,41
2-3В	59,75	86,31	26,56
3	113,12	113,09	0,03
3-3	112,76	111,73	1,03
3-3В	113,67	111,4	2,27

Следует отметить, что определение параметра  $\Delta T_g$  для покрытий холодного отверждения некорректно, поскольку полнота сшивки зависит не от температурного режима сушки, а от стехиометрического соотношения отвердитель–основа. Фактическую адгезионную прочность удалось определить только на образцах с покрытием №1; в остальных случаях отрыв происходил по клею при значениях 25...30 МПа. Таким образом, динамику изменения данного параметра определить не представлялось возможным.

Результаты испытаний на твердость и эластичность 1-й группы образцов при температуре 180 °C отображены в табл. 2. Образцы с маркировкой СС подвергались воздействию СВЧ ЭМП. Образцы с маркировкой БС – воздействию СВЧ ЭМП не подвергались.

2. Результаты испытаний образцов на твердость и эластичность при температуре спекания 180 °C с обработкой СВЧ ЭМП и без нее

Маркировка	Режим (время нагрева, мин – длительность воздействия СВЧ, с/периодичность воздействия, мин.)	$L$ , мкм	Среднее значение твердости*	Среднее значение эластичности*
БС-1	25 (без СВЧ)	650	96	2,42
БС-2	30 (без СВЧ)	490	103	2,80
БС-3	35 (без СВЧ)	640	102	3,33
БС-4	30 (без СВЧ)	590	104	3,18
БС-5	30 (без СВЧ)	610	101	3,94
СС-1	30 - 20/2-4	690	101	1,89
СС-2	30 - 15/3-8	680	100	2,79
СС-3	30 - 10/1-3-8	480	101	5,28
СС-4	30 - 20/2-4	550	100	3,43
СС-5	30 - 10/1-3-8	550	114	6,56

*Приложение. L – толщина покрытия; \* – среднее значение берется после 5-кратного измерения параметра.*

Результаты испытаний на твердость 2-й группы образцов при температуре 200 °C отображены в табл. 3. Образцы 4 – 6, 9 и 10 не подвергались воздействию СВЧ ЭМП, образцы с остальными маркировками подвергались воздействию СВЧ ЭМП. Графики результатов испытаний обеих групп изображены на рис. 1 – 3.

По результатам первого этапа испытаний можно сделать вывод о том, что полученных результатов недостаточно для того, чтобы сделать однозначные и обоснованные выводы о каком-либо влиянии СВЧ ЭМП на твердость и эластичность полимеризованного покрытия,

нанесенного на металл. Температура стеклования полимеризованного покрытия при воздействии СВЧ ЭМП не изменяется, либо снижается на 3...4°. Авторы считают, что это связано с флуктуациями данного параметра по площади покрытия из-за неучтенных факторов влияния на  $T_g$  в процессе полимеризации.

В связи с вышесказанным было принято решение о выборе других характеристик покрытия для исследования, а также об исследовании образцов не в виде покрытий, нанесенных на металлические подложки, а в виде свободных пленок.

3. Результаты испытаний образцов на твердость при температуре спекания 200 °С с обработкой СВЧ ЭМП и без нее

Маркировка	Толщина покрытия, мкм	Режим (время нагрева, мин – длительность воздействия СВЧ, с/периодичность воздействия, мин.	Твердость по шкале Бухгольца, усл.ед.
1	440...550	20-6/2-4	118
2	650...750	20-20/2-4	111
3	750...950	25-20/2-6	118
4	615...960	20 (без СВЧ)	100
5	240...460	20(без СВЧ)	125
6	780...860	30(без СВЧ)	125
7	580...760	20-15/2-3-4-5-6-7	125
8	590...790	20-20/2-4	118
9	620...830	35(без СВЧ)	111
10	620...700	25(без СВЧ)	100
11	350...450	20-20/1-5	111
12	550...900	20-10/2-4-8	125
13	800...880	20-20/1-2-4-8-10-15	100
14	700...800	20-20/3-8	125
15	550...600	25-30/1-4-10	87
16	990...1050	20-15/2-4-8	118
17	450...500	20-30/2-4-8	77
18	300...480	20-20/3-8	125

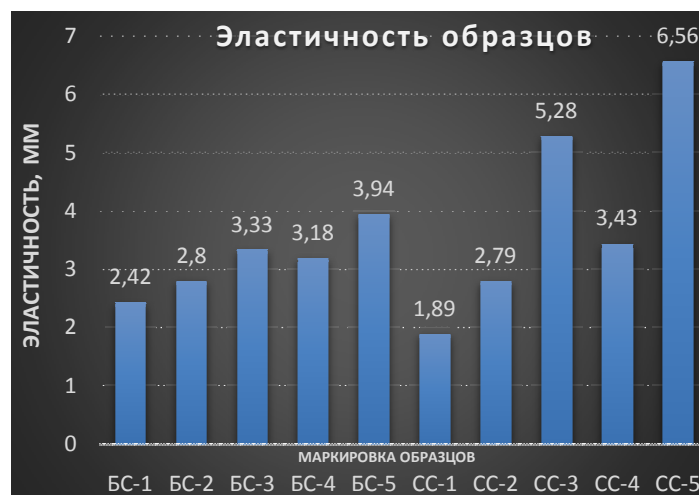


Рис. 1. Твердость по шкале Бухгольца 1-й группы образцов

Рис. 2. Эластичность 1-й группы образцов

Испытания образцов, облученных в процессе термической сшивки покрытия

На втором этапе работ СВЧ воздействие прикладывалось к порошковому ЛКМ в момент расплавления частиц порошка и формирования пленки. Лабораторные исследования параметров эпоксидного компаунда были проведены на образцах покрытий в виде свободных пленок.

Свободные плёнки изготавливались при

следующих условиях: температура запекания  $T = 180...200$  °С; время спекания  $\tau = 20...30$  мин. После изготовления свободных плёнок из них производилась вырезка образцов для испытания на растяжение. Далее образцы подвергались испытаниям на разрывной машине для исследования зависимости механических свойств покрытия от времени и температуры теплового воздействия, а также от режимов воздействия СВЧ ЭМП.



Рис. 3. Твёрдость по шкале Бухгольца 2-й группы образцов

СВЧ-обработка производилась короткими импульсами длительностью в 2 с, спустя 30 с после помещения спекаемых плёнок в печь и далее с таким же временным шагом на протяжении всего процесса полимеризации, чтобы избежать побочного нагрева в процессе полимеризации эпоксидного компаунда. Суммарное время обработки СВЧ ЭМП составляло 40 с. Мощность СВЧ воздействия – 900 Вт, частота излучения –  $2450 \pm 50$  кГц.

После проведения испытаний на растяжение без воздействия СВЧ ЭМП были получены данные, представленные в табл. 4 и 5. В табл. 6 представлены данные испытаний образцов после полимеризации с воздействием СВЧ ЭМП. Сравнительные диаграммы зависимости предела прочности и относительного удлинения от режима полимеризации с воздействием СВЧ ЭМП и без него отображены на рис. 4 и 5.

**4. Результаты испытаний на растяжение при времени полимеризации 20 мин без воздействия СВЧ ЭМП**

Предел прочности на разрыв $\sigma$ и относительное удлинение $\delta, \%$ при времени полимеризации 20 мин											
180 °С			190 °С			200 °С			210 °С		
S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta, \%$	S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta, \%$	S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta, \%$	S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta, \%$
Среднее значение*											
0,76	49,4	5,7	0,36	51,7	5,6	0,88	53,4	5,2	0,5	51,8	4,6
Среднее отклонение, %											
0,1	1,3	3	0,1	2,3	0,4	0,3	2,9	0,3	0	3,8	0,4
<i>Примечание.</i> S – толщина образца; * – среднее значение берется после 10-кратного измерения параметра.											

**5. Результаты испытаний на растяжение при времени полимеризации 30 мин без воздействия СВЧ ЭМП**

Предел прочности на разрыв $\sigma$ и относительное удлинение $\delta, \%$ при времени полимеризации 30 мин											
180 °С			190 °С			200 °С			210 °С		
S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta, \%$	S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta, \%$	S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta, \%$	S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta, \%$
Среднее значение											
0,54	49,8		0,3	55,7	5,5	0,48	59,8	4,9	0,4	43,9	3,4
Среднее отклонение, %											
0	3,4	0,5	0,1	2,5	0,3	0,1	3,8	0,3	0	3,5	0,4

6. Результаты испытаний на растяжение при времени полимеризации 20 мин при импульсном воздействии СВЧ ЭМП

Предел прочности на разрыв $\sigma$ и относительное удлинение $\delta$ , %								
180 °C			190 °C			200 °C		
S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta$ , %	S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta$ , %	S, мм	$\sigma$ , МПа	$\delta$ , %
Среднее значение								
0,29	71,8	5,7	0,2	65,8	5	0,3	63,7	6,4
Среднее отклонение, %								
0,1	2,3	0,4	0,1	4,7	0,4	0	2	0,5

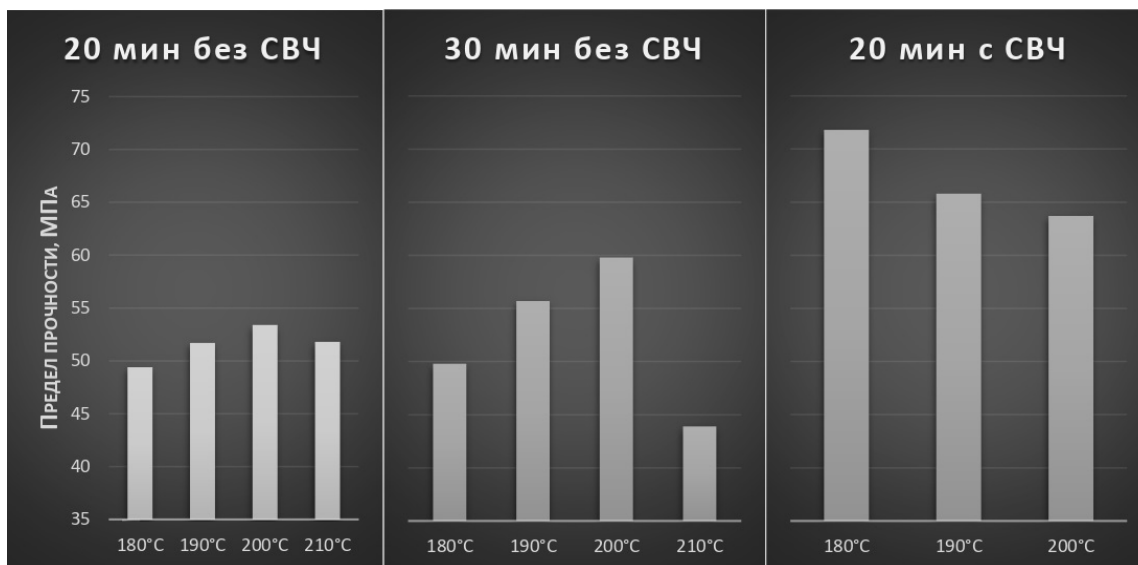


Рис. 4. Зависимость предела прочности от режимов обработки

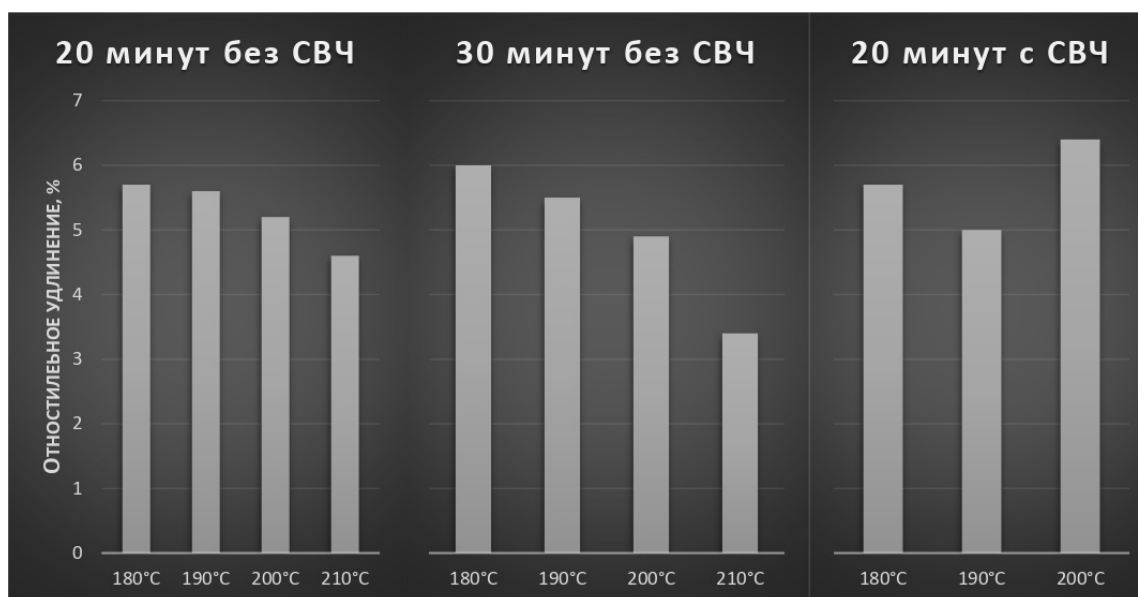


Рис. 5. Зависимость относительного удлинения от режимов обработки

Максимумы значений механических свойств свободных пленок эпоксидного по-

крытия наблюдаются при режиме обработки 180 °C/ 20 мин против 200 °C/30 мин без СВЧ.

### Расчет энергоэкономичности режима полимеризации покрытия с СВЧ-воздействием

Осуществление расчетов и сравнение режимов производилось для полимеризации внутритрубного покрытия 1 тонны труб  $\varnothing 73 \times 5,5$ ,  $L = 12$  м из стали 20 (ГОСТ 1050-88) в промышленной печи полимеризации с расчетной тепловой мощностью 153 кВт, температура в которой не более 250 °С и площадь тепловыделяющей поверхности которой равняется 63,3 м<sup>2</sup>.

Режим 1 – выдержка при 180 °С 20 мин;  
режим 2 – выдержка при 200 °С 30 мин;

масса трубы – 127,3 кг (1 тонна – 8 труб);  
тепловой поток на 1 ед. тепловоспринимающей поверхности 1 тонны труб равен 3,25 кВт/м<sup>2</sup>.

Полезное тепло для нагрева труб до температуры выдержки определяется по формуле

$$W_{\text{полезн.}} = Gc(t - t_0), \quad (1)$$

где  $G$  – масса полезной загрузки;  $c$  – удельная теплоемкость материала загрузки;  $t$  – заданная температура нагрева загрузки;  $t_0$  – начальная температура загрузки;  $W_{\text{полезн.}}$  для 1-го режима – 76 МДж;  $W_{\text{полезн.}}$  для 2-го режима – 85,5 МДж;  $\Delta W_{\text{полезн.}}$  если в процессе выдержки тепловые потери отсутствуют – 11,1 %.

Оценим энергоэкономичность по времени нагрева загрузки. Преобладающим механизмом теплопередачи от нагревателей к загрузке является конвективный теплоперенос. Для случая нагрева длинной тонкой загрузки газовым потоком в продольном направлении загрузки применена методика расчета, разработанная Л.А. Смоленским и изложенная в работе [10].

Время нагрева загрузки при вынужденной конвекции и постоянном тепловом потоке:

$$\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{н*}} G_{\text{м}} c_{\text{м}} / \alpha F, \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{н*}}$  – относительная длительность нагрева при постоянном тепловом потоке;  $G_{\text{м}}$  – вес загрузки;  $c_{\text{м}}$  – удельная средняя теплоемкость стали;  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи от воздушного потока к загрузке ~60 (Вт/м<sup>2</sup> · °С);  $F$  – тепловоспринимающая поверхность загрузки.

Для 180 °С  $\tau_{\text{н}} = 411$  с ~ 7 мин. Для 200 °С  $\tau_{\text{н}} = 469$  с ~ 8 мин.

Тепловые потери через футеровку печи можно оценить по формуле

$$q_{\text{пот.}} = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{s_n}{\lambda_n}}, \quad (3)$$

где  $t_1$  и  $t_{n+1}$  – температуры внутренней и внешней поверхности стенки;  $s_1, s_2 \dots s_n$  – толщины слоев стенки, м;  $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$  – коэффициенты теплопроводности отдельных слоев стенки, Вт/м · °С; температура внешней среды  $t_0 = 20$  °С; температура наружной стенки – 30 °С; температура внутренней стенки на 20 °С больше температуры выдержки в процессе нагрева загрузки и равна температуре выдержки непосредственно в процессе.

Потери тепла всей наружной поверхностью печи составляют:

– при нагреве загрузки 1-го режима 10,4 кВт;  
время 411 с; общие потери 4,2 МДж;

– при выдержке загрузки 1-го режима 9,1 кВт – 20 мин – 1200 с; общие потери – 10,9 МДж;

– при нагреве загрузки 2-го режима – 11,4 кВт; время – 469 с; общие потери 5,3 МДж;

– при выдержке загрузки 2-го режима 10,4 кВт; время 1800 с; общие потери 18,7 МДж.

Потери в процессе нагрева и выдержки загрузки требуют увеличения времени нагрева и включения ТЭНов во время выдержки для компенсации этих потерь. Потери в процессе второго режима ~ на 60 % больше потерь первого за счет более высокого температурного градиента и большей времени выдержки труб в печи:

– суммарные энергетические затраты при 1-м режиме – 91,1 МДж;

– суммарные энергетические затраты при 2-м режиме – 109,5 МДж.

Сходимость результатов расчетов экономии электроэнергии по разнице в тепловой энергии (11 %) и во времени нагрева (12,3 %) позволяет сделать вывод о том, что режим выдержки 20 мин при 180 °С позволяет сэкономить 11...12 % электроэнергии относительно режима 30 мин при 200 °С. Режим выдержки 1 энергоэкономичнее режима 2 по прямому расходу электроэнергии на 60 % и по расходу электроэнергии на компенсацию потерь – на 12 %. Общая разница энергозатрат обоих режимов составляет 20 %.

### Заключение

В процессе исследований СВЧ-воздействия на исследуемое покрытие наилучшие механические свойства наблюдаются при температуре 200 °С, а при последующем повышении температуры прочность падает вследствие деструкции эпоксидной основы. Падение прочности при режиме 210 °С и 30 мин воздейст-



вия составляет 26,5 %, а при 20 мин облучения при 180 °С – 3 %. Это свидетельствует об интенсивной деструкции после полной полимеризации покрытия при температурах выше 200 °С. Можно сделать вывод, что у зависимости «механические свойства – подведенное к системе тепло» есть экстремум на уровне ~ 200 °С и 30 мин воздействия.

При модификации покрытия СВЧ-излучением при температурах 180, 190 и 200 °С наблюдается повышение прочности соответственно на 31, 21 и 16 % при одновременном росте пластичности на 0,3; 4,4 и 18,9 % относительно характеристик необлученных образцов. Увеличение времени полимеризации при облучении СВЧ увеличивает прочность и пластичность материала. Данное явление носит аномальный характер, т.к. без СВЧ воздействия при увеличении прочности наблюдается снижение эластичности (кроме зон деструкции, где оба этих параметра снижаются одновременно).

Учитывая, что средние значения показателей относительного удлинения при СВЧ воздействии находятся внутри доверительного интервала, можно заключить, что облучение не оказывает влияния на эластичность, а полученные значения сопоставимы с относительным удлинением для полимеризованного покрытия без СВЧ. Рост механической прочности при СВЧ воздействии составляет 16,7 % по отношению к максимальному значению прочности без СВЧ воздействия. Дополнительным преимуществом предлагаемой методики является то, что максимум выбранных характеристик наблюдается при режиме 180 °С/20 мин против 200 °С/30 мин без СВЧ. Экономия электроэнергии при этом составляет ~ 20 %, что значительно, поскольку затраты на электроэнергию составляют ~ 25 % в формировании стоимости трубной продукции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данкин, В.В. Экономические аспекты использования труб с внутренним антикоррозионным покрытием / В.В. Разумовский, Е.У. Масютина, Е.М. Ловцова // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. – 2011. – №5(27). – С. 23-25.
2. Гостинин, И.А. Сравнительный анализ срока службы трубопроводов с внутренним антикоррозионным покрытием и трубопроводов из стали 20 КТ в Западной Сибири // Территория Нефтегаз. – 2014. – №6. – С. 56-58.
3. Князева, Ж.В., Юдин, П.Е., Петров, С.С., Максимук, А.В. Механизмы разрушения внутренних антикоррозионных покрытий нефтепромысловых трубопроводов // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, вып. 3, Физика. – С. 780-783.
4. Юдин, П.Е., Князева, Ж.В., Оценка барьерных

свойств внутренних антикоррозионных покрытий нефтепроводных и насосно-компрессорных труб с помощью автоклава теста // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. – 2016. – № 1(53). – С. 3-8.

5. Александров, Е.В. Новая методика автоклавного теста для экспресс-анализа антикоррозионных покрытий // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. – 2015. – № 3(49). – С. 3-11.

6. Калганова, С.Г. Влияние СВЧ воздействия электромагнитного поля на кинетику отверждения эпоксидов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – №1(10). Вып.1. – С. 90-96.

7. Абуталипова, Е.М. Улучшение эксплуатационных свойств изоляционных покрытий с использованием сверхвысокочастотного излучения // Нефтегазовое дело. Электронный научный журнал. – 2013. – №4. – С. 316-327.

8. Лаврентьев, В.А. Модификация волокнистого поликапроама в СВЧ электромагнитном поле / С.К. Слепцова, В.А. Лаврентьев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2006. – №4(19). Вып.4. – С.144-147.

9. Пятаев, И.В., Студенцов, В.Н. Влияние электромагнитных колебаний СВЧ на структуру и свойства термопластов и реактопластов // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 2(75). – С. 86-93.

10. Смоленский, Л.А. Конвективные электропечи. – М.: Изд-во Энергия, 1972. – 168 с.

## REFERENCES

1. Dankin, V.V. Economic aspects in use of pipes with inner antirust coating / V.V. Razumovsky, E.U. Masyutina, E.M. Lovtsova // *Pipeline Transportation. Theory and Practice*. – 2011. – No.5(27). – pp. 23-25.
2. Gostinin, I.A. Life comparative analysis of pipelines with inner antirust coating and pipelines of 20KT steel in Western Siberia // *Oil Gas Territory*. – 2014. – No.6. – pp. 56-58.
3. Knyazeva, Zh.V., Yudin, P.E., Petrov, S.S., Maximuk, A.V. Mechanisms of inner antirust coating decomposition in oil field pipelines // *Bulletin of Tambov University. Natural and Engineering Sciences Series*. – 2016. – Vol.21. Edition 3, Physics, - pp. 780-783.
4. Yudin, P.E., Knyazeva, Zh.V. Boundary property assessment of inner antirust coatings in oil transportation pipes and compressor pipes using autoclave test // *Pipeline Transportation. Theory and Practice*. – 2016. – No.1(53). – pp. 3-8.
5. Alexandrov, E.V. New method of autoclave test for express analysis of antirust coatings // *Pipeline Transportation. Theory and Practice*. – 2015. – No.3(49). – pp. 3-11.
6. Kalganova, S.G. SHF electromagnetic field impact upon kinetics of epoxy condensation // *Bulletin of Saratov State Technical University*. – 2006. – No.1(10). Edition 1. – pp. 90-96.
7. Abutalipova, E.M. Insulating coating operation properties improvement using super-high frequency radiation // *Oil and Gas Science. Electronic Scientific Journal*. – 2013. – No.4. – pp. 316-327.
8. Lavrentiev, V.A. Fiber polycapraamide modification in SHF electromagnetic field / S.K. Slapsova, V.A. Lavrentiev // *Bulletin of Saratov State Technical University*. – 2006. – No.4(19). Edition 4. – pp. 144-147.
9. Pyataev, I.V., Studentov, V.N. SHF electromagnetic oscillation impact upon structure and properties of thermoplastic and reactoplastic // *Bulletin of Saratov State Technical University*. – 2014. – No.2(75). – pp. 86-93.
10. Smolensky, L.A. *Convective Electric Furnaces*. – M.: Energy Publishers, 1972. – pp. 168.

Рецензент д.т.н. О.Н. Федонин