

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИФЕНИЛЕНСУЛЬФИДА

© Р. М. Ахмадуллин¹, С. А. Ирдинкин², В. Ф. Шкодич^{1,*}, А. В. Раков²,
М. М. Фарахов², И. Н. Сайфуллин³, А. Г. Ахмадуллина¹, И. С. Антипин⁴

¹ ООО «НТЦ «Ахмадуллины»,
420029, г. Казань, ул. Сибирский Тракт, д. 34, корп. 10

² ООО ИВЦ «Инжехим»,
420049, г. Казань, ул. Шаляпина, д. 14/83

³ Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

⁴ Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

* E-mail: shkodich@mail.ru

Поступила в Редакцию 10 июня 2022 г.

После доработки 17 октября 2022 г.

Принята к публикации 18 октября 2022 г.

Разработана технология получения полифениленсульфида с низкой вязкостью расплава в условиях жидкофазной поликонденсации при $pH > 12$ и ступенчатого регулирования температуры на стадиях форполиконденсации от 160 до 220°C и дополиконденсации от 230 до 260°C. Показана возможность регулирования показателя текучести расплава полифениленсульфида от 300 до 18 г/10 мин путем ступенчатого регулирования избытка Na_2S и температуры в процессе поликонденсации полифениленсульфида. Оптимальная длительность получения полифениленсульфида составила 16 ч. Полифениленсульфид по физико-механическим свойствам соответствует термопласту Ryton® XE5500BL (Solvay), но характеризуется на 50% пониженным водопоглощением.

Ключевые слова: полифениленсульфид; термопласт; жидкофазная высокотемпературная поликонденсация; показатель текучести расплава; термостабильность

DOI: 10.31857/S0044461822070076; EDN: DMOWFI

Полифениленсульфид является термопластичным полимером с комплексом уникальных характеристик. Он отличается особой прочностью, упругостью и огнестойкостью, имеет хорошую жесткость и ударопрочность, изделия сохраняют форму при повышенных температурах.

Для изготовления различных по назначению устройств и деталей используются композитные материалы на основе полифениленсульфида, армированные и модифицированные наполнителями, волокнами и другими полимерами [1]. Полимерные композиционные материалы на основе полифениленсульфида характеризуются термической и химической стойкостью, что позволяет эксплуатировать

их в агрессивных средах [2] в качестве защитных покрытий, контейнеров, автомобильных деталей, компонентов насосов, клапанов и оборудования для нефтяных месторождений [3].

В настоящее время на рынке выпускается два типа коммерческого полифениленсульфида: разветвленный и линейный (экструзионные марки). Экструзионные марки полифениленсульфида Ryton® были успешно внедрены в производство гидравлических узлов силовых агрегатов автомобилей [4]. Полифениленсульфид Fortron® используется при производстве деталей водяных и топливных насосов автомобиля [5].

В настоящее время композитная промышленность характеризуется значительным ростом потребления

термопластичных композитов в аэрокосмической отрасли, в основном из-за того что высокоэффективные легкие композитные конструкции более экономичны, чем их металлические предшественники [6]. Согласно отчету Grand View Research, Inc., объем мирового рынка полифениленсульфида достигнет 2.14 млрд \$ к 2025 году, а среднегодовой темп роста составит 8.8% [7]. По прогнозам, самый большой объем потребления будет в автомобильной промышленности в виде деталей карбюраторов, клапанов возврата выхлопных газов, клапанов управления потоком, предназначенных для систем отопления, и пластинах зажигания.

Промышленно реализованным способом получения линейного полифениленсульфида является высокотемпературная поликонденсация арилдигалогенидов с сульфидом натрия [8, 9]. Совершенствование технологии получения полиариленсульфидов связано с оптимизацией соотношения исходных мономеров, температурных параметров синтеза, использованием различных каталитических систем, комплексообразователей, сомономеров.

Цель исследования — разработка технологии получения высокомолекулярного полифениленсульфида путем жидкофазной поликонденсации в избытке NaOH ($\text{pH} > 12$) без дополнительных катализаторов; определение влияния технологических параметров (продолжительность и температура синтеза) на реологические характеристики получаемых полифениленсульфидов.

Экспериментальная часть

В работе использовали 1,4-дихлорбензол (Acros Organics, кат. № 113190025, 99+%), водный раствор гидросульфида натрия технический (АО «Волжский Оргсинтез», 30%), натр едкий технический марки РД высший сорт (ООО «ЛабЭксперт», 47.5%), в качестве растворителя использовали N-метилпирролидон (ООО «ЦентрХимСервис», 99.92%), азот газообразный повышенной чистоты (ООО «ТехноРемСтрой Казань», 99.99%), полифениленсульфид линейного строения марки NHU-PPS 1330C (Zhejiang NHU Special Materials Co., Ltd).

Получение форполимера осуществляли в реакторе высокого давления объемом 25 л, который был выполнен на основе титанового сплава марки BT1-0 (ООО ИВЦ «Инжехим»). Выбор этого материала для реактора обусловлен высокой коррозионной стойкостью при повышенных температурах (~240°C) и концентрациях щелочи. Стадию дополиконденсации проводили в стальном реакторе марки 12X18H10T высоко-

го давления объемом 25 л (ООО ИВЦ «Инжехим»). Выход полифениленсульфида определяли весовым методом.

Определение показателя текучести расплава образцов полимера проводили на экструзионном пластометре A-MELT (NOSELAB ATS) в соответствии с [10], метод С при температуре 320°C и массе груза 5 кг. Диаметр фильеры 2 мм.

Экспериментальные исследования процессов стеклования и плавления полифениленсульфидов проводили методом дифференциальной сканирующей калориметрии с использованием калориметра DSC 214 Polyma (Netzsch). Полученные экспериментальные данные обрабатывали с использованием стандартного пакета программ NETZSCH Proteus analysis.* При исследовании плавления использовали режим линейного нагрева от 25 до 400°C со скоростью 10 град·мин⁻¹, масса образца 10–15 мг. Измерения проводили в атмосфере азота.

Изготовление гранул полифениленсульфида осуществляли на опытной экструзионной линии LTE-20-32 (Labtech Engineering Company Ltd). Температура экструзии по зонам экструдера не превышала 310°C.

Предел текучести, прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве определяли на универсальной машине Gotech AI 7000 M (GOTECH Testing Machines Inc.) в соответствии с [11] при условиях: скорость раздвижения зажимов испытательной машины $V = 5 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$, $T = 23^\circ\text{C}$, относительная влажность 17%.

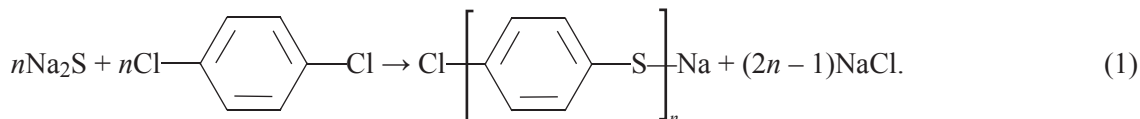
Изгибающее напряжение при максимальной нагрузке, модуль упругости при изгибе определяли на универсальной машине Gotech AI 7000 M (GOTECH Testing Machines Inc.) в соответствии с [12] при условиях: скорость испытания $V = 2 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$, $T = 24^\circ\text{C}$.

Удельное объемное сопротивление определяли в соответствии с [13] на термометре ТОММ-01 (ООО «НПП «Норма»). Водопоглощение определяли в соответствии с [14], метод 1. Плотность гидростатическим взвешиванием определяли в соответствии с [15], этанол, метод 3. Температуру изгиба под нагрузкой определяли на анализаторе теплостойкости HV 2000A-C6 (GOTECH Testing Machines Inc.) в соответствии с [16], режим А, температуру теплопередающей среды равномерно повышали со скоростью 120 град·ч⁻¹. Расстояние между опорами 64 мм. Образец в виде бруска 80 × 10 × 4 мм.

* NETZSCH Proteus Thermal Analysis v.4.8.1. NETZSCH-Gerätebau — Bayern, Germany, 2005.

Обсуждение результатов

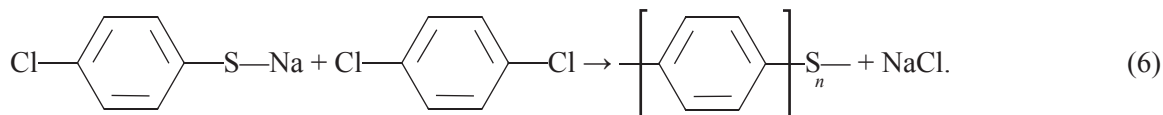
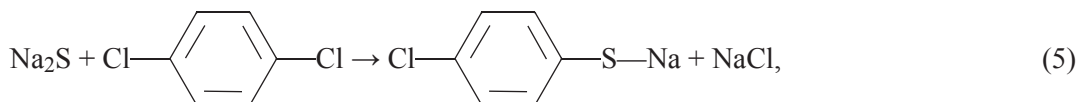
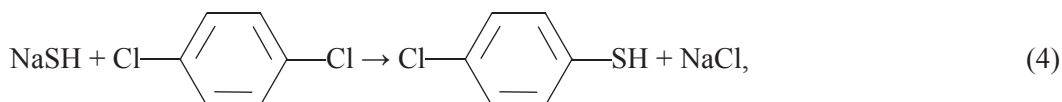
Полупромышленный синтез полифениленсульфида проводили путем жидкофазной высокотемпе-



На начальных стадиях процесса происходит частичный гидролиз Na_2S с образованием гидросульфида (2), который затем взаимодействует с *n*-дихлорбензолом с образованием 4-хлор-тиофенола (4). Растворенный Na_2S параллельно реагирует с *n*-дихлорбензолом с образованием 4-хлортиофенолята натрия (5), который, реагируя с *n*-дихлорбензолом, приводит к образованию димеров, тримеров и

ракурной поликонденсации Na_2S и *n*-дихлорбензола (1) в *N*-метилпирролидоне, в бескислородной среде:

полимеров (6) [17, 18]. С ростом температуры степень гидролиза Na_2S увеличивается [17, 18]. В реакции поликонденсации Na_2S с *n*-дихлорбензолом гидролиз Na_2S приводит к снижению скорости поликонденсации и образованию свободного H_2S и продукта взаимодействия с *N*-метилпирролидоном, который впоследствии приводит к деструкции полифениленсульфида.



В работе [17] показано, что H_2S может выступать ингибитором процесса поликонденсации, а образование NaHS приводит к появлению небольшого количества элементарной серы, способствующей процессу поликонденсации галогенбензолов с сульфидами металлов. С целью контроля степени гидролиза и соответственно процесса поликонденсации форполиконденсацию и дополиконденсацию проводили при $\text{pH} > 12$.

Известно, что определяющее влияние на комплекс функциональных свойств получаемого полифениленсульфида оказывают температурные параметры синтеза. Сдвиг поликонденсационного равновесия в сторону образования полифениленсульфида начинается выше $T = 140-150^\circ\text{C}$ [18].

В данной работе на первой стадии синтезировали форполимер при температуре $160-210^\circ\text{C}$ при изотермическом и ступенчатом нагреве реакционной массы согласно принципиальной схеме (рис. 1). В реакторе P-201 синтезировали Na_2S . В ре-

акторе P-202 при температуре $160-210^\circ\text{C}$ в среде *N*-метилпирролидона протекала первая стадия форполиконденсации *n*-дихлорбензола и Na_2S в среде азота. Дополиконденсация проводилась в реакторе второй стадии синтеза P-203 в температурном интервале $210-260^\circ\text{C}$. Синтезированный полифениленсульфид фильтровали и промывали *N*-метилпирролидоном, водой в фильтре Ф-201. Промытый порошкообразный полифениленсульфид выгружали и направляли на сушку.

Величина показателя текучести расплава полифениленсульфида снижается в условиях увеличения температуры с 200 до 210°C и продолжительности времени стадии форполиконденсации (табл. 1). Полифениленсульфид, синтезированный в изотермических условиях, при 200 и 210°C (табл. 1) на стадии форполиконденсации имеет высокие показатели текучести расплава, характерные для олигофениленсульфидов. Ступенчатый же подъем температуры на стадии форполимеризации от 160 до 210°C оказывает

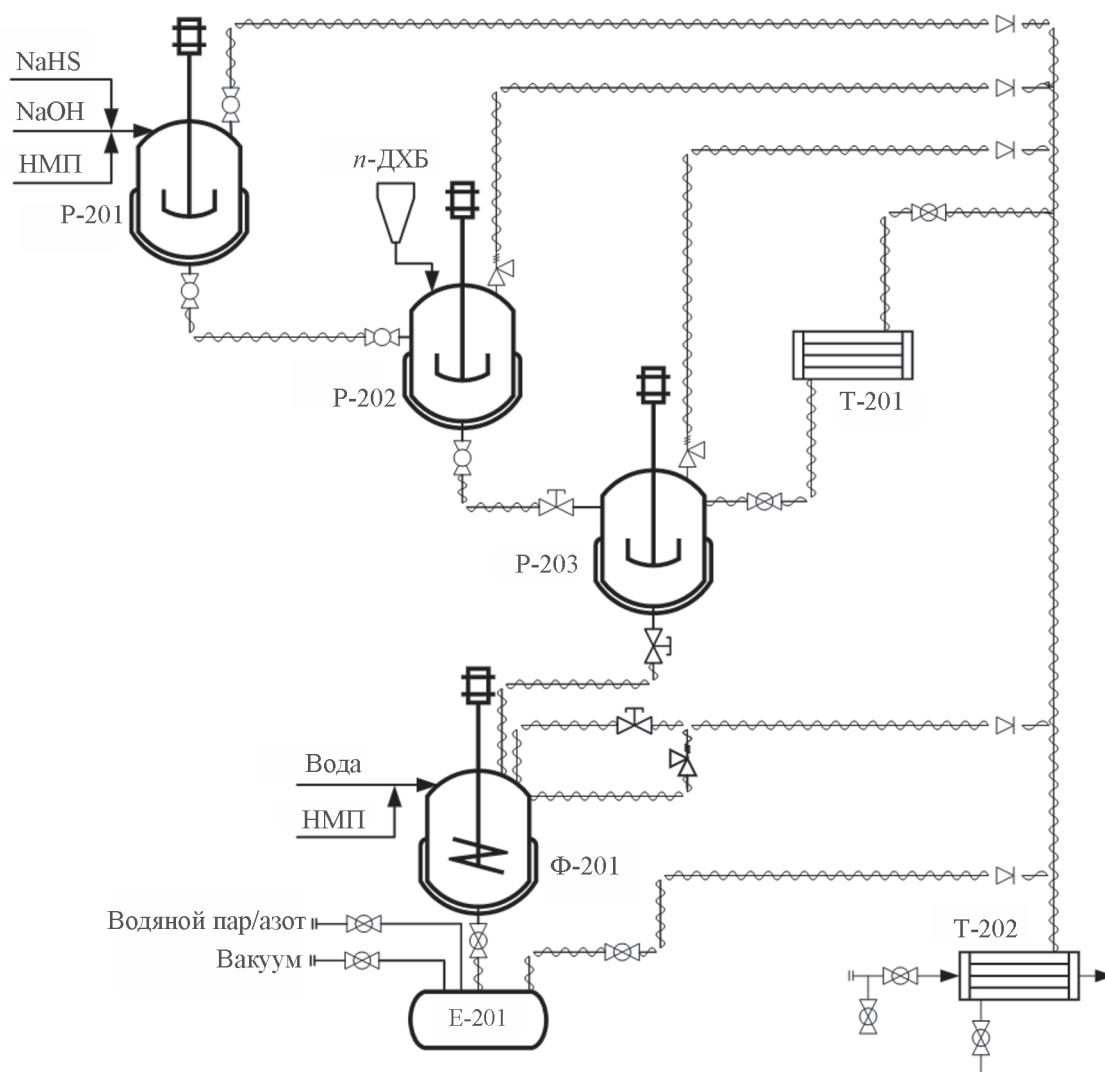


Рис. 1. Принципиальная схема получения полифениленсульфида.
 НМП — N-метилпирролидон, *n*-ДХБ — *n*-дихлорбензол.

Таблица 1

Влияние условий проведения синтеза форполимера на показатель текучести расплава полифениленсульфида*
 $[n\text{-Дихлорбензол}]/[\text{Na}_2\text{S}]/[\text{H}_2\text{O}] = 1:1.07:1.5$, давление избыточное 0.4–0.5 МПа

Температура, °С/время, ч				Показатель текучести расплава, г/10 мин	$T_{\text{пика пл}}$, °С
ступень 1	ступень 2	ступень 3	ступень 4		
200/10	—	—	—	633	279.7
210/5	—	—	—	570	279.8
210/10	—	—	—	498	280.1
180/2	210/10	—	—	436	280.4
160/1	170/1	180/2	210/10	301	280.5

* Стадию дополиконденсации проводили при 250 (5 ч), 260°С, (5 ч); $[n\text{-дихлорбензол}]/[\text{H}_2\text{O}] = 3.0$; «—» — отсутствие температурного воздействия.

сравнительно большее влияние на индекс расплава полифениленсульфида, значения которого снижаются в 2 раза.

Все полученные полимеры характеризуются высокими значениями температуры плавления кристаллической фазы. Следует отметить, что температура пика плавления кристаллической фазы синтезированных полимеров не зависит от температурных условий, поддерживаемых на стадии форполиконденсации, и индекса вязкости расплава (табл. 1, рис. 2). В термограммах полифениленсульфида (рис. 2) в зависимости от температурных условий на стадии форполиконденсации фиксируется рост степени кристалличности с 59 до 63%, что свидетельствует о формировании в условиях ступенчатого регулирования температуры более упорядоченной структуры полифениленсульфида наряду с увеличением вязкости расплава. Все синтезированные полифениленсульфиды не уступают по термическим характеристикам зарубежному аналогу NHU-PPS Polymer 1330C (Zhejiang NHU Special Materials Co., Ltd) со степенью кристалличности 54%, который используется для изготовления компаундов (рис. 2, кривая 1).

Ступенчатое увеличение температуры от 170 до 220°C на стадии форполиконденсации приводит к

дальнейшему снижению значений показателя текучести расплава полифениленсульфида (табл. 2). При этом увеличение нижнего температурного предела до 190°C в исследуемом температурном диапазоне позволяет снижать индекс расплава и время синтеза. В результате образуется полифениленсульфид с наиболее низкой вязкостью расплава 251 г/10 мин. Общее время поликонденсации снижается на 6 ч.

На стадии жидкофазной дополиконденсации можно нарастить молекулярную массу полимера путем увеличения температуры и продолжительности времени синтеза. В данной работе показатель текучести расплава полифениленсульфида не претерпевает значительных изменений в условиях увеличения температуры с 230 до 260°C на стадии дополиконденсации. Существенное влияние на показатель текучести расплава на этой стадии оказывает продолжительность синтеза в исследуемом температурном диапазоне. Ступенчатое регулирование температурного режима до 260°C стадии дополиконденсации обеспечивает снижение продолжительности синтеза на 2 ч и незначительное увеличение выхода полифениленсульфида (табл. 3). Оптимальное время синтеза полифениленсульфида с наиболее низким показателем текучести расплава 251 г/10 мин составляет 18 ч.

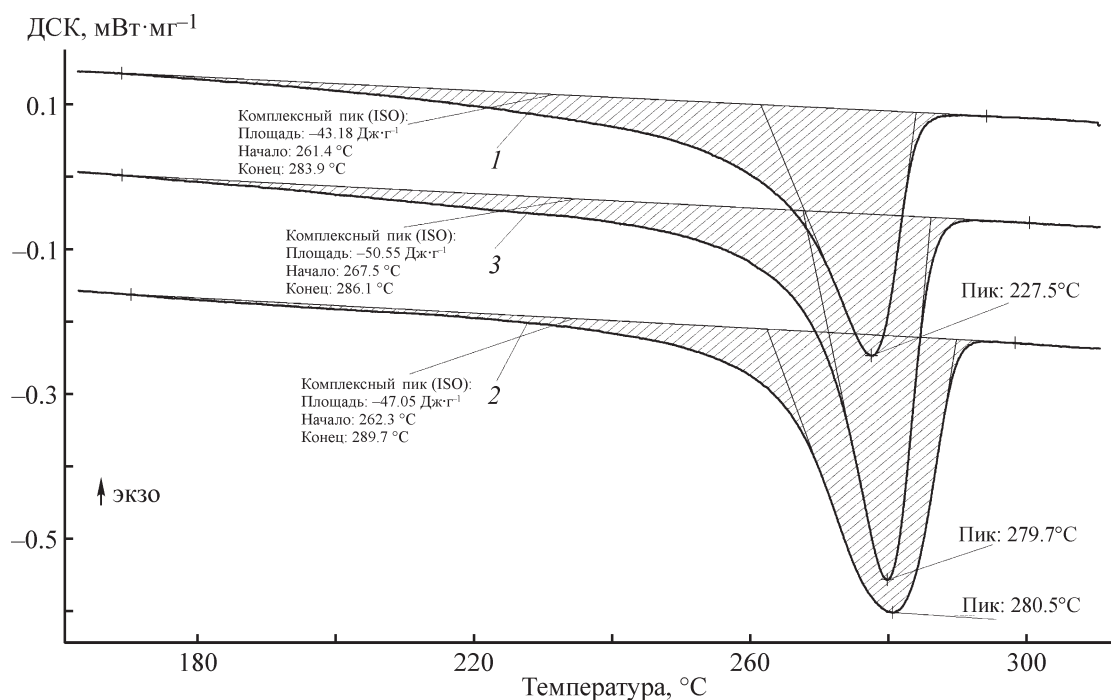


Рис. 2. Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии второго нагрева полифениленсульфида. 1 — полифениленсульфид NHU-PPS Polymer 1330C (Zhejiang NHU Special Materials Co., Ltd); продукты, полученные в условиях: 2 — форполиконденсация: 210°C (10 ч), дополиконденсация: 250°C (5 ч), 260°C (5 ч); 3 — форполиконденсация: 160°C (1 ч), 170°C (1 ч), 180°C (2 ч), 210°C (10 ч), дополиконденсация: 250°C (5 ч), 260°C (5 ч).

Таблица 2

Показатель текучести расплава полифениленсульфида на стадии форполиконденсации в зависимости от температурного режима синтеза*

$$[n\text{-Дихлорбензол}]/[\text{Na}_2\text{S}]/[\text{H}_2\text{O}] = 1:1.07:1.5$$

Температура, °С/время, ч				Показатель текучести расплава, г/10 мин
ступень 1	ступень 2	ступень 3	ступень 4	
160/1	170/1	180/2	210/10	301.0
170/1	180/1	190/2	210/9	289.0
180/1	190/1	200/2	210/8	278.0
190/1	200/1	210/2	220/1	266.0
190/1	200/1	210/4	220/2	255.0
190/1	200/1	210/3	220/3	251.0

* Стадию дополиконденсации проводили при 250 (5 ч), 260°С (5 ч); $[n\text{-дихлорбензол}]/[\text{H}_2\text{O}] = 3.0$.

Таблица 3

Показатель текучести расплава и выход полифениленсульфида на стадии дополиконденсации в зависимости от температурного режима синтеза*

$$[n\text{-Дихлорбензол}]/[\text{Na}_2\text{S}] = 1.07, \text{ давление избыточное } 2.0\text{--}2.5 \text{ МПа}$$

Температурный режим, °С/время синтеза, ч				Показатель текучести расплава, г/10 мин	Выход, %
ступень 1	ступень 2	ступень 3	ступень 4		
250/4	260/4	—	—	329.0	70.5
250/5	260/5	—	—	251.0	69.0
240/2	250/4	260/4	—	271.0	71.3
230/2	240/2	250/2	260/2	256.0	71.9

* Стадию синтеза форполимера проводили при 190 (1 ч), 200 (1 ч), 210 (3 ч), 220°С (3 ч); $[n\text{-дихлорбензол}]/[\text{H}_2\text{O}] = 3.0$; «—» — отсутствие температурного воздействия.

Свойства готового полифениленсульфида и до некоторой степени характер прохождения реакций на конечных стадиях поликонденсации зависят от средней молекулярной массы полученного полимера. Следовательно, необходимо регулировать длину цепи

полимеров в процессе их промышленного производства. Это возможно изменением мольного соотношения реагирующих компонентов.

В данной работе показано влияние снижения избытка Na_2S в исходной смеси на показатель текучести

Таблица 4

Зависимость показателя текучести расплава полифениленсульфида от избытка Na_2S $[n\text{-дихлорбензол}]/[\text{Na}_2\text{S}]^*$

Образец	$[n\text{-Дихлорбензол}]/[\text{Na}_2\text{S}]$	Показатель текучести расплава, г/10 мин
Полифениленсульфид 1	1.07	251
Полифениленсульфид 2	1.06	180
Полифениленсульфид 3	1.05	120
Полифениленсульфид 4	1.04	80
Полифениленсульфид 5	1.03	40
Полифениленсульфид 6	1.02	20

* Стадию синтеза форполимера проводили при 190 (1 ч), 200 (1 ч), 210 (3 ч), 220°С (3 ч); стадию дополиконденсации проводили при 230 (2 ч), 240 (2 ч), 250 (2 ч), 260°С (2 ч).

Таблица 5
Характеристики ненаполненных полифениленсульфидов

Показатель	Ryton@ XE5500BL	Полифениленсульфид 6
Предел текучести, МПа	Не указан	79.3 ± 0.7
Прочность при разрыве, МПа	55	69.2 ± 5.1
Относительное удлинение при разрыве (по захватам), %	15	13 ± 1
Изгибающее напряжение при максимальной нагрузке, МПа	100	116 ± 1
Модуль упругости при изгибе, МПа	2500	2720 ± 120
Показатель текучести расплава, г/10 мин	20*	18**
Удельное объемное сопротивление, Ом·см	1.00·10 ¹⁵	2.14·10 ¹⁴
Водопоглощение, %	0.1	0.04
Плотность гидростатическим взвешиванием, г·см ⁻³	1.3	1.296 ± 0.003
Температура изгиба под нагрузкой, °С	95	105
Температура плавления, °С	—	278
Температура стеклования, °С	—	99.8

* $T = 316^{\circ}\text{C}$, вес груза 5 кг.

** Показатель текучести расплава определяли в соответствии с [20]; $T = 320^{\circ}\text{C}$, вес груза 5 кг, диаметр фильеры 1.180 мм.

расплава полифениленсульфида в установленных оптимальных условиях поликонденсации (табл. 4). Снижение избытка Na_2S приводит к значительному снижению показателя текучести расплава до 20 г/10 мин, что соответствует высокомолекулярному полифениленсульфиду [19]. Таким образом, регулирование избытка Na_2S в синтезе полифениленсульфида позволит в зависимости от поставленных задач варьировать индекс расплава полифениленсульфидов в широком диапазоне.

Полученный полифениленсульфид 6 (табл. 4) был гранулирован методом экструзии. По ряду физико-механических характеристик (табл. 5) полученный полифениленсульфид соответствует термопласту Ryton@ XE5500BL (Solvay), который представляет собой термически обработанный, ненаполненный полифениленсульфид и применяется в производстве деталей для аэрокосмической промышленности. Модуль упругости термопласта варьируется от 1500 до 2500 МПа в соответствии требованиями, предъявляемыми к гибким трубам для термоформования после экструзии.

Полифениленсульфид 6 в сравнении с термопластом Ryton@ XE5500BL (табл. 5) характеризуется высокими показателями физико-механических свойств и пониженным водопоглощением, что характерно для линейного полифениленсульфида, макро-

молекулы которого образуют высокоупорядоченные надмолекулярные структуры.

Выводы

В условиях ступенчатого регулирования температурного режима стадии форполиконденсации в температурном интервале $190\text{--}220^{\circ}\text{C}$ образуется полифениленсульфид с наиболее низкой вязкостью расплава. Продолжительность стадии синтеза составляет 8 ч.

Выявлено, что ступенчатое регулирование температуры оказывает влияние на микроструктуру образующегося в процессе синтеза полифениленсульфида. Полимеры, синтезированные в таких условиях, обладают большей упорядоченностью структуры.

Поликонденсация полифениленсульфида в условиях незначительного избытка мономера Na_2S ($[\text{n-дихлорбензол}]/[\text{Na}_2\text{S}] = 1.02$), ступенчатого регулирования температуры с продолжительностью синтеза 16 ч приводит к образованию высокопрочного термопласта с индексом расплава 18 г/10 мин.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

Р. М. Ахмадуллин разрабатывал технологию получения полифениленсульфида, анализировал экспериментальные данные; А. В. Раков проводил физико-механические испытания гранулированного ненаполненного полифениленсульфида; В. Ф. Шкодич проводила литературный анализ и термические измерения полифениленсульфидов; С. А. Ирдинкин разрабатывал технологию получения и изготовления гранулированного ненаполненного полифениленсульфида; М. М. Фарахов разрабатывал принципиальную схему и аппаратное оформление процесса получения полифениленсульфида; И. Н. Сайфуллин проводил экспериментальное исследование текучести расплава синтезированного полифениленсульфида, провел подготовку образцов для физико-механических испытаний; А. Г. Ахмадуллина проводила определение физико-химических характеристик полифениленсульфида; И. С. Антипин — постановка задач, плана и направления исследования и обсуждение результатов.

Информация об авторах

Ахмадуллин Ренат Маратович, к.х.н., ген. директор ООО «НТЦ «Ахмадуллины»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3215-275X>

Ирдинкин Сергей Александрович, зам. начальника производства ООО ИВЦ «Инжехим»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0034-2751>

Шкодич Валентина Федоровна, к.х.н., вед. инж. ООО «НТЦ «Ахмадуллины»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5962-1907>

Раков Александр Владимирович, вед. инж. ООО ИВЦ «Инжехим»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1349-9782>

Фарахов Марат Мансурович, зам. директора ООО ИВЦ «Инжехим»

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4597-9753>

Сайфуллин Ильдан Нажибович

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3817-7448>

Антипин Игорь Сергеевич, проф., д.х.н., член-корр. РАН

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9882-7035>

Список литературы

- [1] *Chen G., Mohanty A. K., Misra M.* Progress in research and applications of Polyphenylene Sulfide blends

and composites with carbons // *Compos. Part B: Engineering*. 2021. V. 209. ID 108553.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108553>

- [2] *Zhang K., Zhang G., Liu B., Wang X., Long S., Yang J.* Effect of aminated polyphenylene sulfide on the mechanical properties of short carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide composites // *Compos. Sci. Technol.* 2014. V. 98. P. 57–63.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.04.020>

- [3] *Shao Y., Xu F., Li W., Zhang K., Zhang Ch., Li R., Qiu Y.* Interfacial strength and debonding mechanism between aerogel-spun carbon nanotube yarn and polyphenylene sulfide // *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.* 2016. V. 88. P. 98–105.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.05.025>

- [4] *Hu J., Fei Li, Wanga B., Zhang H., Ji Ch., Wang S., Zhou Z.* A two-step combination strategy for significantly enhancing the interfacial adhesion of CF/PPS composites: The Liquid-phase oxidation followed by grafting of silane coupling agent // *Compos. Part B: Engineering*. 2020. V. 191. ID 107966.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107966>

- [5] *Backe D., Balle F.* Ultrasonic fatigue and microstructural characterization of carbon fiber fabric reinforced polyphenylene sulfide in the very high cycle fatigue regime // *Compos. Sci. Technol.* 2016. V. 126. P. 115–121.

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.02.020>

- [6] *Favaloro M.* Properties and processes of linear polyphenylene sulfide (PPS) for continuous fiber composites aerospace applications // *SAE Technical Paper*. 2009. <https://doi.org/10.4271/2009-01-3242>

- [7] Research GV 15893742 Polyphenylene Sulfide (PPS) Market Size, Share & Trends Analysis Report By Region (MEA, Europe, APAC), By Application (Coatings, Automotive, Electrical & Electronics, Industrial), And Segment Forecasts, 2019–2025. P. 110.

- [8] Pat. US 9587074 (publ. 2017). Multi-stage process for forming polyarylene sulfides.

- [9] Pat. US 10501582 (publ. 2019). Method of producing polyarylene sulfide.

- [10] ASTM D 1238. Standard test method for melt flow rates of thermoplastics by extrusion plastometer.

- [11] ГОСТ 11262–2017. Пластмассы Метод испытания на растяжение.

- [12] ГОСТ 4648. Пластмассы. Методы испытания на статический изгиб.

- [13] ГОСТ 6433.2. Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения электрического сопротивления при постоянном напряжении.

- [14] ГОСТ 4650. Пластмассы. Методы определения водопоглощения.

- [15] ГОСТ 15139–69. Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы).

- [16] ГОСТ 12021. Пластмассы и эбонит. Метод определения температуры изгиба под нагрузкой.
- [17] Трофимов Б. А., Амосова С. В. Дивинилсульфид и его производные. Новосибирск: Наука, 1983. С. 15–18.
- [18] Allam C., Liu K. J., McGrath J. E., Mohanty D. K. Preparation and properties of novel aromatic poly(thioethers) derived from 4,4-thiobisbenzenethiol // Macromol. Chem. Phys. 1999. V. 200. N 8. P. 1854–1862. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3935\(19990801\)200:8<1854](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3935(19990801)200:8<1854)
- [19] Пат. 2700417С1 РФ (опубл. 2019). Способ получения суперконструкционных полифениленсульфидов.
- [20] ГОСТ 11645. Пластмассы. Метод определения показателя текучести расплава термопластов.
-