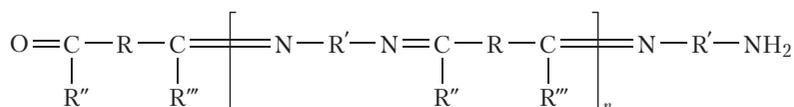


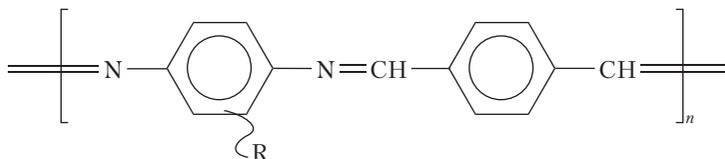
2.2.2. Электропроводящие полимеры

Электропроводящие полимеры с «внутренней» (собственной) электрической проводимостью (*ICP, Intrinsic Conductive Polymers*) перспективны для использования не только в качестве компонентов интеллектуальных материалов молекулярного уровня, материалов молекулярной электроники и оптоэлектроники, обеспечивающих предельную миниатюризацию систем получения, анализа отображения, хранения информации (см. раздел 1.3.1.1), но и в качестве компонентов радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов.

К эффективным поглощающим ЭМЭ электропроводящим полимерам относятся полиазометины (полишиффовы основания) и металлокомплексные фенопласты. Наличие в цепях системы сопряженных двойных связей в полиазометинах (молекулярная масса - несколько тысяч) обуславливает их полупроводниковые свойства. Удельная объемная электрическая проводимость γ лежит в пределах $\sigma_{293} 1 \cdot 10^{-15} - 3 \cdot 10^{-20} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Концентрация парамагнитных частиц $10^{15} - 10^{19}$ спин/г [10].



R – алкил, арил; R', R'', R''' – H, алкил, арил.



Полиазометилены (полишиффовы основания) поглощают высокочастотное электромагнитное излучение и могут быть использованы в качестве компонентов радиопоглощающих материалов и покрытий [66].

Допированные полиазометины (соли оснований) значительно легче ферритов (см. далее), на их основе легко изготовить композиции, наносимые по лакокрасочной технологии. Они превосходят ферриты по способности поглощать ВЧ- и СВЧ-излучения, причем малый уровень коэффициента отражения достижим при меньшей (примерно в 10 раз) массе РПП, которые, предположительно, позволят уменьшить отражательную способность объекта на 80%. Эти материалы имеют черный цвет, по своим физическим свойствам они напоминают графит и характеризуются высокой полярностью, а частота поглощаемого электромагнитного излучения зависит от их химического состава. Смешивая несколько материалов, можно получить РПП, которое способно сделать объект малозаметным для РЛС обнаружения и широком диапазоне частот, при этом тепло, выделяемое при поглощении полимером ВЧ- и СВЧ-энергии, приводит к незначительному повышению температуры поверхности объекта, что практически не изменит его ИК-заметность [92].

Материалы на основе электропроводящих полимерных связующих (допированный натрием полиацетилен, 7,7,8,9-тетрафтальцианинметан), металлизированных тканей (толщина 0,05–20 мкм), полупроводниковых порошков с $\gamma 10 - 10^4 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ обеспечивают защиту от ЭМИ в полосе частот $10^4 - 10^{11}$ ГГц, устраняют паразитные электромагнитные волны на частоте 50 Гц и поглощают ЭМИ на частоте 1 ГГц до уровня 45–55 дБ [26, 93].

Для создания магнитных металлкомплексных композиций опробованы комплексы MeTMФ, содержащие ионы Fe, Ni и Co. Ионы Fe способны образовывать ферромагнитные оксиды ($\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ и Fe_3O_4) с высокой магнитной восприимчивостью и повышенной температурой перехода в парамагнитное состояние (точкой Кюри). Такое сочетание свойств, а также дешевизна и доступность солей, делают выбор ионов Fe, Ni и Co предпочтительным

по сравнению с ионами редкоземельных элементов (Gd, Tb, Dy, Ho, Er), которые хотя и имеют значительно более высокий магнитный момент, но образуют ферромагнетики с низкой точкой Кюри. Так, Gd имеет самую высокую точку Кюри среди редкоземельных ферромагнетиков, равную 290 К [11].

Ионно-кластерная (плоские циклы шириной до 1 нм) и ионнодоменная (ионные домены, не менее 1 мкм) структура металл-комплексных композиций определяет низкий коэффициент отражения R , что обусловлено большим отношением μ^*/ϵ^* , значениями магнитной индукции и проницаемости:

MeПМФ	Магнитная индукция, Тл·10 ³	Магнитная проницаемость, μ
FeПМФ	1,32	3,5
NiПМФ	0,53	1,4
CoПМФ	0,57	1,5

Относительно высокими диэлектрическими ϵ'' и магнитными μ'' потерями.

2.2.3. Углеродные материалы

В качестве наполнителей материалов поглощающих и экранирующих ЭМЭ радиодиапазона широко используют токопроводящие углеродные материалы: технический углерод, графиты, сажи, углеродные и графитизированные волокна, в том числе, металлизированные и различные текстильные формы из них (нити, жгуты, ленты и ткани).

Для углерода характерно образование различных аллотропных структур: алмаз, графит, карбин, переходные формы (гомогенно-неграфитизирующие, гомогенно-кристаллизирующиеся и другие).

Алмаз (sp^3 -гибридизация) — пространственный полимер с тетраэдрическим расположением валентных связей, кубическая гранецентрированная ($a = 0,35597$ нм) трехмерная сетка ковалентных тетраэдрических (sp^3 -гибридных) связей с расстоянием C—C 0,15445 нм. $\sigma_{\text{теор}}^+ = 200$ ГПа; $E_{\text{теор}}^+ = 1220$ ГПа.

Графит (sp^2 -гибридизация) — «паркетный» полимер, состоящий из атомов углерода sp^2 -гибридизации, расположенных в одной плоскости (решетка двухмерная, гексагональная упаковка, $\rho_{\text{теор}} = 2,27$ г/см³). Имеет высокий модуль упругости ($\sigma_{\text{Итеор}}^+ = 140$ ГПа; $E_{\text{Итеор}}^+ = 1060$ ГПа) благодаря высокой (710 кДж/моль) энергии связи C—C в плоскости атомных слоев (ковалентные связи в базисных плоскостях). Длина связи C—C 0,1415 нм. В графите между плоскостями — физические связи ($G_{\text{сд}} = 4,5$ ГПа; $E_{\perp} = 36,5$ ГПа). Кристалл может быть легко изогнут (турбостратный углерод) из-за смещения ориентации базисных осей. Дефекты повышают $G_{\text{сд}}$, но являются зародышами трещин. В плоскостях — делокализация валентных π -электронов (полупроводник).

Карбин (sp -гибридизация) — полимер с линейными (длина 50–250 нм, до 2000 атомов углерода) цепочками полиинового —C=C—C=C— и (или) кумуленового =C=C=C= типа. $\sigma_{\text{теор}}^+$ до 230 ГПа. При $T \approx 2800$ °C в аргоне превращается в графит ($\rho = 1,9$ –22 г/см³).

К переходным формам углерода относятся гомогенно-неграфитизирующиеся формы (углеродные волокна), гомогенно-кристаллизирующиеся, графитизирующиеся формы (графитизированные волокна), аморфные и частично кристаллизирующиеся формы (пироуглерод), пирографит, стеклоуглерод, сажи, коксы, фуллерены (букиболы), нанотрубки, астралены (фуллероидные многослойные углеродные наночастицы, см. раздел 1.4).

Электрические свойства переходных форм углерода, как органических полупроводников, определяются делокализованными π -электронами. По величине (10^2 – 10^{10} Ом⁻¹см⁻¹) и характеру электропроводимости углеграфитовые тела причисляют к полупроводникам, причем углеродные волокна относят по типу проводимости к органическим полупроводникам, а графит и графитизированные волокна охватывают область от полупроводников до проводников.

Структура углерода в его волокнистых формах предопределяет высокие значения их упруго-прочностных свойств:

Углеродные материалы	$\sigma_{\text{теор}}^+$	$E_{\text{теор}}^+$	$\sigma_{\text{практ}}^+$	$E_{\text{практ}}^+$
Карбин (сверхкороткие кристаллы)	220–230	–	–	–
Алмаз	200	1220	–	–
Графитовые кристаллы (плотность идеального графита 2,27 г/см ³)	140	1060	–	–
Стеклоуглерод	300	≈1000	–	–
Нитевидные кристаллы («усы»)	–	–	20	900
Промышленные УВ	70	–	2–2,8 (до 5–7)	180–500
Сверхвысокомодульные УВ из ЖК-пеков типа <i>P-UHM</i>	25	–	2,2–2,5 (до 4)	700–1000

2.2.3.1. Углеродные и графитизированные волокна (УВ)

Наряду с высокими упруго-прочностными свойствами УВ представляют большой интерес для техники в связи с ценным комплексом эксплуатационных свойств: электропроводность, радиопоглощение (использование в силовых и радиопоглощающих конструкциях технологии *Stealth*), химическая и радиационная стойкость, теплопроводность, абляционные и триботехнические свойства, адсорбционная активность.

Высокопрочные и высокомодульные УВ (и текстильные формы из них) — компоненты многофункциональных углепластиков (углеволоконитов) конструкционных и специальных (радиопоглощающие, экранирующие, интеллектуальные) ПКМ, ВПКМ, ИПКМ.

Упруго-прочностные и электрические свойства УВ определяются условиями их получения.

Углеродные волокна ($T < 1700$ °С, $E_{\text{П}}^+ \leq 345$ ГПа) — переходная гомогенно-неграфитизирующаяся форма углерода sp^2 -, sp^3 - (в области сконцентрированных шестичленных ароматических циклов, гексагонов, «паркетные» плоскости, слои), sp -гибридизированных связей С–С с анизотропной фибриллярной структурой. В углероде неграфитизирующихся форм монослои ароматического углерода «сшиты» термически прочными полииновыми –С≡ и кумуленовыми =С= цепочками углерода (с двумя σ -связями, π -связями) в пространственный полимер, неспособный к гомогенной кристаллизации в графитоподобную структуру, но базисные плоскости образуют пачки параллельных турбостратных графитовых кристаллов («паркетные» плоскости в микрофибрилле).

Графитовые (графитизированные) волокна ($T > 1700$ °С, $E_{\text{П}}^+ \geq 345$ ГПа), выше 1900 °С — гомогенная кристаллизация, графитизация ($E_{\text{акт}} = 82$ кДж/моль) с формированием трехмерно-упорядоченной структуры. Монослои «сшиты» тремя σ -связями и одной π -связью полиенового типа –СН=СН–. При графитизации из-за их деструкции происходит поворот монослоев и укладка углеродных ароматических слоев в графитоподобную структуру. Межплоскостное расстояние d_{002} для предельно графитизированного (при 2000–2500 °С) графита составляет 0,3358 нм.

Процесс получения УВ включает несколько стадий (на примере пиролиза ПАН) (рис. 2.41):

1. Пряжа из ПАН ($\rho_v = 10^8$ Ом·м) после переработки в ПАН-волокно (1 %об. пор) при 160–270 °С подвергается контролируемому низкотемпературному окислению с растяжением (ПАН набирает до 8 %масс. кислорода с последующим соединением параллельно ориентированных макромолекул); стабилизация ПАН-волокон; окислительная дегидратация, циклизация,

окисление, вытяжка в водяном паре), для получения волокон диаметром 5–8 мкм, плотность 1,36 г/см³, деформацией > 3% (иначе трещины и обрывы).

2. Карбонизация включает несколько стадий: образование лестничных полимеров, нафтининовых структур, полимеризация по группам $-C\equiv N$ с образованием полициклов. При карбонизации при 1000–1500 °С в азоте происходит выделение H_2 , NH_3 , H_2O , HCN , CH_4 , CO_2 , CO , углеводородов (потеря массы 40–45%, до 60% при 1600 °С). При $T > 600$ °С — начало деазотирования, 900 °С — максимальное выделение азота, при 1000 °С в волокне содержится 94% углерода, 6% азота, после 1200–1300 °С — 80–95% (до 98%) углерода, при 1300 °С < 0,3% азота. Азот формирует электрические свойства УВ (N-ловушка для электронов). Диазотирование при 600–1300 °С приводит к резкому падению электросопротивления из-за высокой проводимости базовых графитовых плоскостей. При 1750 °С имеет место резкое изменение электронной структуры углерода в волокне (повышение значений относительной поперечной термо-ЭДС, снижение ρ_v , электросопротивление волокон становится равным электросопротивлению нихрома, а теплопроводимость УВ в продольном направлении — теплопроводимости стали). Температуры пиролиза 1200–1400 °С обеспечивают максимальное значение прочности волокон. Выше 1400 °С σ^+ снижается из-за трещин вдоль оси волокна, анизотропии физического сжатия при охлаждении волокна после термообработки.

3. Графитизация при $T > 1800$ °С, до 2500–2800 °С (2100 °С — с кристаллизаторами, пропитка солями металлов), азот, вакуум. Содержание углерода в волокне до 99%, вытяжка до 30% до 2250 °С, $\rho_v = 0,1$ Ом·м. Образование в карбонизированных (углеродных) и «графитизированных» волокнах фибрилл-лентоподобных (ширина 10–100 нм и более) изогнутых базисных плоскостей (ленточные структуры в скелете фибриллярной сетки). Фибриллы — длинные волнистые ленты из конденсированных углеродных полициклов нескольких типов: длина и амплитуда лент мала — турбостратный углерод в оболочке волокон (0,3–0,5 диаметра волокна 800–15000 нм); длина и амплитуда лент велики — стеклоглерод в ядре волокна.

Толщина ленты 29–90 Å определяется числом слоев (5–30) с расстоянием между плоскостями 3,37–3,45 Å, в монокристалле — 3,35 Å (ангстрем, Å, 10^{-10} м, нанометр, нм 10^{-9} м). Эти характеристики и, особенно, угол разориентации лент определяют σ^+ и E^+ волокон.

Волокна содержат неорганические и органические включения, пустоты, иглообразные и цилиндрические поры (удаление растворителей) длиной до 300 Å, диаметром 1–20 Å. Активность углерода в базисных графитовых плоскостях в 10–12 раз ниже, чем у углерода в торцах (используется для активации поверхности волокон, $\gamma_F = 20$ эрг/см², например, метод ЭХО). Структурные параметры УВ приведены на рис. 2.41.

2.2.3.2. Сажи

Использование технического углерода в виде саж и графита обусловлено высокой дисперсностью таких углеродных материалов и их большим электросопротивлением.

Ценной особенностью некоторых видов саж является их способность структурироваться в цепочки. Структура и свойства различных саж оказывают решающее значение на свойства экранирующих и поглощающих ЭМЭ материалов, поэтому всегда следует учитывать виды и технологию приготовления различных саж и графита.

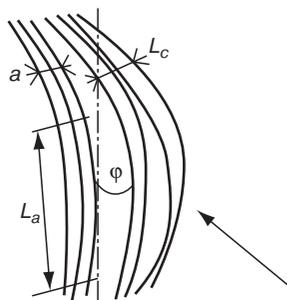
Сажа является продуктом неполного сгорания органических веществ или, что более часто встречается, их термического разложения и представляет собой мелкодисперсный углерод с незначительным содержанием примесей (поликонденсированных ароматических соединений). Размеры частиц сажи находятся в пределах от 100 до 3000 нм.

Важнейшими характеристиками сажи, определяющими электрические свойства наполненной полимерной композиции, являются: дисперсность, малый размер первичной структуры, малое количество примесей, формирование вторичных структур, электропроводность.

Используют три основных типа саж:

Диффузионные газовые сажи (капельные), получаемые осаждением на движущиеся поверхности из диффузионного пламени природного газа при свободном доступе воздуха;

Образование лестничных нафтинидовых структур
 Деазотирование (начало 600 °С, максимум — 900 °С) 1300 °С ≤ 0,3% азота в UV резкое падение электросопротивления 1200–1400 °С максимальное значение прочности σ углеродных волокон (в высокомолекулярных прочных волокнах Геркулес AS1-AS6 3K-12K содержание азота 3–4%, 85% С, 11% O, ρ 0,4–70 Ом/см, $\lg \delta$ (10^{14} Гц), 0,17–0,32



L_c — толщина ленты графита, число слоев 5–30 (2–9 нм)
 L_a — длина «прямого» участка базовых плоскостей в ленте
 a — расстояние между плоскостями 0,337–0,345 нм (монокристалл 0,335 нм)
 ϕ — угол разориентации

1 — Ядро (сердцевина). Фибриллы не параллельны поверхности — стеклоуглерод
 2 — Оболочка (шкурка, 0,3–0,5 диаметра волокна). Фибриллы параллельны поверхности — турбостартовый углерод
 3 — Внутренние и поверхностные трещины, поры: l до 30 нм, d 0,1–2 нм
 4 — торцы базисных плоскостей
 5 — базисные плоскости

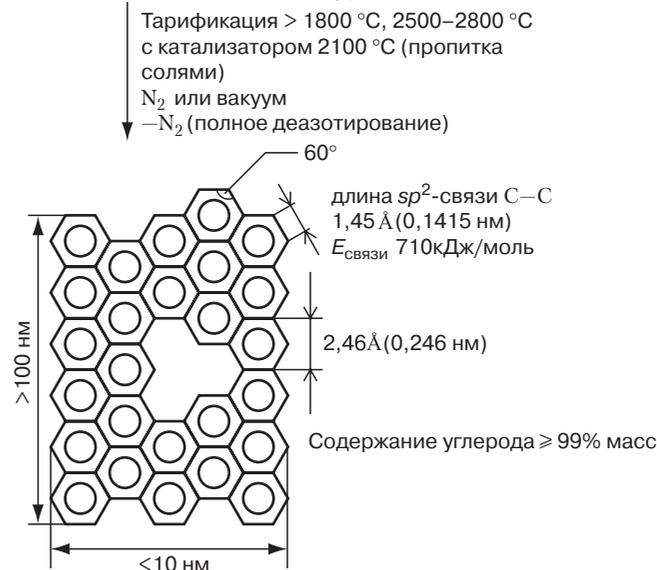
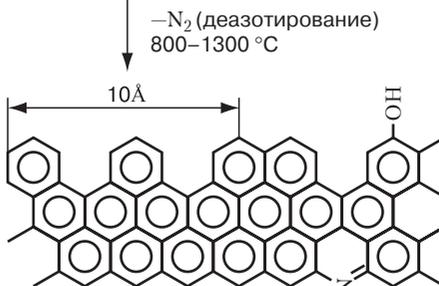
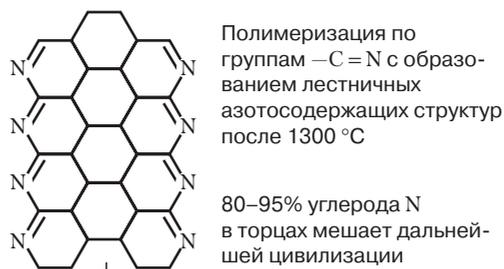


Рис. 2.41. Химизм процесса получения и структура при пиролизе ПАН [77, 96, 97]

1. Турбулентные сажи (печные), получаемые осаждением на стенках камеры при неполном сгорании жидкого топлива или его смеси с природным газом;
2. Ацетиленовая сажа (взрывная), получаемая взрывом ацетилена в закрытых объемах с помощью электрического запала. Отличается почти полным отсутствием примесей, сильным структурированием и большой электропроводностью (табл. 2.39).
3. Ассортимент углеродных саж постоянно расширяется в связи с их широким использованием не только в качестве пигментов и технологических добавок, но прежде всего, для снижения электросопротивления ПМ и улучшения электропроводящих свойств саженаполненных полимерных композиций (сверх- и суперэлектропроводящие углеродные сажи) [138].

Массовое использование электронных устройств, сотовых телефонов, компьютеров стимулирует разработку полимерных композиций, в которых электропроводность необходима для защиты элементов интегральных схем от статических разрядов и экранирование их от электромагнитных полей.

Другой постоянно расширяющейся сферой применения проводящих полимеров остается производство кабелей и проводов, где использование проводящих саж необходимо для создания полупроводящих конструкций, выполняющих роль защитного слоя между проводящей металлической жилой и непроводящим полимерным изолятором.

Дальнейшее расширение применения углеродных саж ожидается в автомобильной промышленности. Для нанесения покрытия как на металлическую, так и на полимерную поверхность за одну операцию полимерная поверхность должна обладать проводимостью, что достигается благодаря предварительному покрытию полимерных частей проводящим грунтом или использованию полимера, которому проводимость придана за счет введения углеродной сажи.

Факторами, определяющими электропроводность сажи (рис. 2.42), являются площадь поверхности (суммарная площадь внешних и внутренних, в микропорах, поверхностей базовых углеродных частиц, объединенных в первичные агрегаты; БЭТ по поглощению азота и йода), структура (склонность базовых углеродных частиц агрегировать в разветвленные войлокоподобные образования; степень структурирования, пористость в $\text{см}^3/100 \text{ г}$ определяется по поглощению дибутилфталата) и химическая природа поверхности сажи (электропроводность саж уменьшается с увеличением концентрации на поверхности кислородсодержащих групп-лактонных, хинонных, гидроксильных, карбоксильных; мерой измерения этих параметров

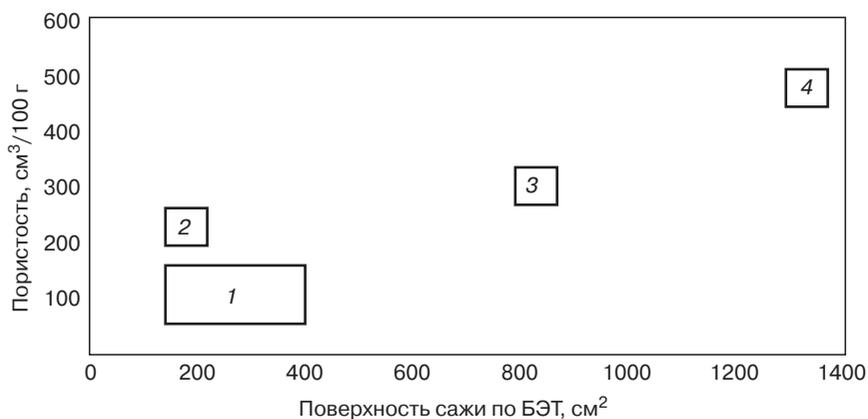


Рис. 2.42. Значения пористости и удельной площади поверхности для различных видов саж [138]: 1 — печная сажа; 2 — ацетиленовая сажа; 3 — электропроводящие сажи; 4 — суперэлектропроводящие сажи.

является степень летучести). Кроме химической частоты электропроводность сажа зависит от содержания золы, металлов, серы.

Электропроводящая углеродная сажа может быть представлена как вещество, построенное из отдельных блоков. Самые маленькие представляют собой базовые углеродные частицы в виде микросфер диаметром приблизительно 30 нм, сформированные слоями атомов углерода. Они могут быть как цельными, так и полыми. Чем базовые частицы более полые, тем более развитой поверхностной площадью они обладают (йодная абсорбция).

Большое количество базовых углеродных частиц образует первичные агрегаты, ответственные за структуру вещества. Их размер варьируется от 100 до 1000 нм. Если в процессе переработки первичные агрегаты разбиваются, часть электропроводных свойств теряется.

Большинство первичных агрегатов совместно образуют агломераты, размеры которых находятся в диапазоне от 10 до 100 мкм. Во многих случаях сажа поставляется в виде гранул. Гранулы и агломераты легко разбиваются в ходе компаундирования и/или технологических операций, таких как перемешивание или экструдирование.

В процессе смешивания с полимерами необходимо обеспечить дробление агломератов сажи на первичные агрегаты и равномерное распределение последних в смеси. При слишком низком наполнении смеси сажей расстояние между первичными агрегатами достигает значений, не допускающих беспрепятственного перемещения электронов в смеси (что, собственно, и является электропроводимостью). При критических и выше концентрациях сажи межагрегатное расстояние сокращается настолько, что позволяет связующим силам между частицами сажи формировать электропроводящие пути. Это приводит к формированию хорошей всесторонней электропроводящей сети в матрице смеси.

Таблица 2.39. Характеристики саж, применяемых в производстве электропроводящих полимерных материалов [94, 95]

Характеристики	Диффузионные (канальные), газовые высокодисперсионные		Диффузионная газовая	Турбулентные печные			Ацетиленовая взрывная	
	КГ-300	КГ-200	ДГ-100	ТМ-70	ТМ-30	ТМ-15	—	
Дисперсность	Удельная поверхность, м ² /г	300	200	78÷117	70÷80	30	15	60
	Размер частиц, нм	10	15	2,7÷45	40÷45	100	200	46÷52
Первичная структура	Длина кристаллитов, нм	2,95		2,6÷2,8	2,38	—		3,4/4,7
	Толщина кристаллитов, нм	1,32÷1,37		1,22÷1,37	1,45	—		2,46÷2,66
	Межплоскостное расстояние, нм	0,72÷0,77		0,72÷0,723	0,713	—		0,68÷0,686

Окончание табл. 2.39

Характеристики	Диффузионные (канальные), газовые высокодисперсионные		Диффузионная газовая	Турбулентные печные			Ацетиленовая взрывная
	КГ-300	КГ-200		ДГ-100	ТМ-70	ТМ-30	
Вторичная структура	Объемное число до грануляции, см ² /г	8	14	—	8+10	5+6	
	После грануляции	—	2,5+3,0	2,5+3,0	—	—	
	Маслоемкость, мл/г	1,3	0,9+1,0	1,1+1,2	—	1,2+1,4	
Летучие	Летучие, %	7,4+14,0	4,5+6,0	0,5	3	0,3	
	Летучие после прокаливания при 1700 °С, %	1,5+1,8	1,0+1,6	0,3	0,6	0,3	
Электропроводность	РН до прокаливания	2,4+4,1	3,6+4,6	7+8	6+7	8+10	
	ρ_v в насыщенном виде, Ом·см	10000+40000	1500+ 15000 (гранул.)	40+60 (гранул.)	100+500	120+600	
	То же, после прокаливания	100+200	40+50 (гранул.)	30+40 (гранул.)	30+40	30+40	
	То же при давлении 10 МПа	4+5	1,5+3,0	1+2,5	1+2	1+2	

Чтобы электроны могли перемещаться по токопроводящим путям, агрегаты не обязательно должны контактировать физически, достаточно уменьшить зазор до нескольких нанометров. Электроны могут преодолевать такие межагрегатные зазоры скачком за счет так называемого «туннельного эффекта». С увеличением наполнения полимера сажей удельное сопротивление (электропроводимость) фактически не изменяется до того момента, пока не будет построена электропроводящая сеть, обеспечивающая «туннелирование» электронов. Данное состояние называется «перколяционным порогом» или «точкой флокуляции».

Дальнейшее повышение саженалопнения приводит к резкому снижению значений удельного сопротивления. Однако при определенных уровнях наполнения происходит насыщение электропроводящей сети и дальнейшее увеличение саженалопнения практически не сказывается на изменении сопротивления. Значение перколяционного порога зависит от типа углеродной сажи, типа полимера, технологии производства так же, как и от присутствия других добавок.

Дисперсия является ключевым параметром, отражающим проводимость смеси/частицы. Чем лучше дисперсия, тем меньшее количество проводящей сажи необходимо для получения требуемого удельного сопротивления.

Электропроводящие углеродные сажи отличаются по химической чистоте, величине поверхности и электропроводности (табл. 2.40, рис. 2.43).

Таблица 2.40. Свойства некоторых типов зарубежных электропроводящих саж [138]

Свойства	<i>Ketjenblack EC 300J</i> , фирма <i>Akzo Nobel</i>	<i>Ketjenblack EC 600JD</i> , фирма <i>Akzo Nobel</i>	<i>Printex XE2</i> , фирма <i>Degussa</i>	<i>Ensaco 350</i> , фирма <i>MMM</i>	<i>Ensaco 250</i> , фирма <i>MMM</i>	<i>Denka Black</i> , фир- ма <i>Denka</i>
Адсорбция I_2 , мг/г	775	1075	923	775	96	98
Адсорбция ДБФ, мл/100г	324	490	325	274	175	193
Летучесть, %	0,5	0,6	0,9	0,6	0,4	0,3
pH	8,6	9,0	7,0	7,8	7,2	6,9
Насыпная плот- ность, г/л	134	107	134	134	170	207
Объемное сопротив- ление, Ом·см	19(10%)*	22(6%)	17(10%)	20(10%)	14(20%)	54(20%)
Содержание золы, %	0,01	0,02	0,23	0,02	0,01	0,01
Содержание серы, %	0,03	0,06	0,14	0,01	0,01	0,01
Содержание Na, K, Ca, Mg, мг/кг	9	19	270	28	35	1
Содержание тяже- лых металлов, мг/кг	7	6	510	16	2	1

*%об. сажи в полипропилене

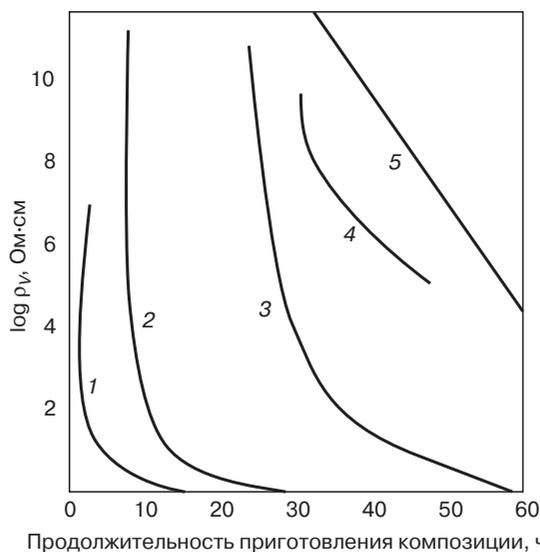


Рис. 2.43. Зависимость электропроводности токопроводящих композиций на основе полипропилена от продолжительности приготовления композиции и типа сажи [138]: 1 — сажа EC-600JD; 2 — сажа EC-300J; 3 — сверхпроводящая печная сажа; 4 — ацетиленовая сажа; 5 — высокоактивная печная сажа.