

Изменение механических характеристик полиэтилена под действием электрического разряда в воде

В. М. Бычков, В. М. Косенков

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, e-mail: v.m.kosenkov@gmail.com*

Исследованы изменения механических характеристик полиэтилена высокого давления, используемого в качестве высоковольтной изоляции, в результате действия на него ударной волны, возникающей при электрическом разряде в воде, на основе изучения динамических и статических свойств полиэтилена, а также его реологических характеристик. Отмечены существенное отличие динамических характеристик полиэтилена от статических и необходимость учёта этих особенностей при выборе высоковольтной изоляции, подверженной действию ударных волн, генерируемых электрическим разрядом в воде.

Ключевые слова: электрический разряд в воде, динамические и статические свойства полиэтилена, метод Гопкинсона-Кольского.

УДК 678.742.2: 537.528

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая изоляция, применяемая в установках, которые осуществляют электрический разряд в воде для выполнения разного рода технологических процессов, находится под действием многих факторов [1–4]. К механическому фактору можно отнести воздействие на изолятор высоких импульсных гидравлических давлений, создаваемых ударными волнами, генерируемыми расширяющимся каналом разряда [1, 4]. К факторам, сопровождающим электрический разряд в воде, также относятся мощные электромагнитные поля (десятки тысяч эрстед). Электрический разряд сопровождается интенсивными импульсными световыми, инфракрасными, ультрафиолетовыми, а также рентгеновскими излучениями, изменяющими свойства изоляции. Частично влияние этих факторов было исследовано в ряде работ. Так, в [5] установлено существенное влияние магнитного поля на механические свойства немагнитных материалов. Совместное действие электрического поля и механического деформирования полимеров исследовано в [6], где отмечено существенное уменьшение порога пробоя изоляции под действием механического нагружения.

Действие отмеченных факторов, как правило, приводит к механическому разрушению изоляторов электродов и выводу из строя электрогидравлического оборудования, снижению его надежности и длительности эксплуатации без ремонтно-профилактических работ. Особую важность эта проблема приобретает для мощных электрических разрядов с запасаемой энергией, составляющей десятки килоджоулей. Эти обстоятельства показывают актуальность исследова-

ний влияния указанных факторов, сопровождающих электрический разряд в воде, на механические свойства полиэтилена, который чаще всего служит высоковольтной электрической изоляцией электродов.

Цель данной работы – изучение изменения механических характеристик полиэтилена высокого давления, используемого в качестве высоковольтной изоляции, под действием факторов, сопровождающих электрический разряд в воде.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРОВ

Прочность полимера зависит от времени действия нагрузки, температуры, структуры материала, наличия различных дефектов и других особенностей структуры, например ориентации молекул [7].

Механические свойства полимеров существенно зависят от их молекулярной массы. Чем больше молекулярная масса, тем больше температура плавления, вязкость, модуль упругости и предел прочности полимеров [8].

Полиэтилен высокого давления (ПЭВД) и низкой плотности имеет среднюю молекулярную массу 80 000–500 000 а. е. м. и степень кристалличности – 50–60%. Полиэтилен низкого давления (ПЭНД) и высокой плотности имеет среднюю молекулярную массу 80 000–3 000 000 а. е. м., а степень кристалличности – 75–85% [8]. На рис. 1 показано схематическое строение полиэтилена [7].

Кристаллическое состояние полимеров характеризуется тем, что звенья макромолекул образуют структуры с трехмерным дальним порядком. Полимеры никогда не кристаллизуются полностью, в них наряду с кристаллитами сохра-

няются аморфные области (с неупорядоченной структурой). Поэтому полимеры в кристаллическом состоянии называются аморфно-кристаллическими или частично кристаллическими. При кристаллизации кристаллиты представляют собой одиночные правильно ограниченные пластины (ламели), которые образуются путем складывания макромолекулы "на себя". При этом ось макромолекулы оказывается перпендикулярной плоскости пластины, а на поверхности последней локализуются петли (рис. 1). Из-за наличия участков, в которых собраны петли складывающихся макромолекул и потому отсутствует кристаллический порядок, степень кристалличности даже у отдельных полимерных монокристаллов всегда меньше 100% [8].

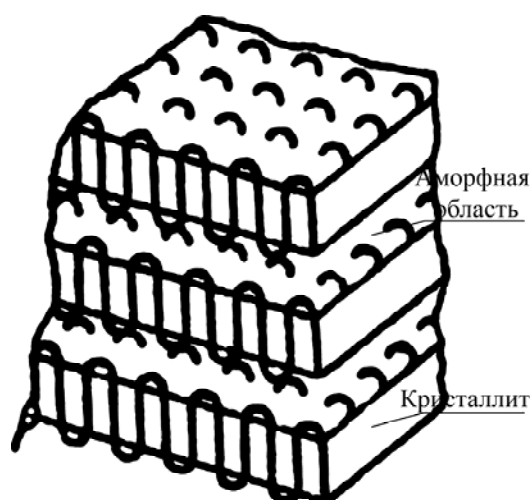


Рис. 1. Складки макромолекул в кристаллитах полиэтилена.

Особенности молекулярного строения полимеров приводят к существенному отличию их механического поведения от других твердых материалов. Оно состоит в том, что при деформации полимеры проявляют одновременно свойства упругости, как твердые тела, и текучести – как жидкость. Вязкоупругость, то есть замедленное развитие упругих деформаций в полимерах, – наиболее характерная черта их свойств. Это значит, что деформация, развивающаяся в полимере под действием нагрузки, зависит от времени, прошедшего от начала нагружения [7].

ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИЭТИЛЕНА

Для определения механических характеристик полиэтилена высокого давления были изготовлены образцы цилиндрической формы из материала электрической изоляции электродов, которые подвергли влиянию факторов, сопровождающих электрический разряд в воде (приблизи-

тельно 1000 разрядов при запасаемой энергии от 10 до 40 кДж), и материала электродов, не находившихся под влиянием электрического разряда.

Статические испытания на сжатие образцов ПЭВД проводили на лабораторном стенде [9]. Основная особенность стенда – обеспечение возможности деформирования образцов с минимально возможной скоростью – от 10^{-4} до 10^{-3} 1/с (квазистатически). Испытания проводили при температуре окружающей среды от 3 до 5°C. Диаметр образцов составлял $7 \pm 0,15$ мм, а длина – $7 \pm 0,2$ мм. Результаты испытаний приведены на рис. 2.

С учетом и без учета влияния электрического разряда в воде статические характеристики сжатия полиэтилена высокого давления отличаются на 10% при общей деформации 0,2 (рис. 2). Это отличие находится в пределах погрешности определения статических характеристик, составляющей $\pm 5\%$.

В отличие от металлов полиэтилен обладает большой предельной упругой деформацией. У полиэтилена, на который не действовали факторы электрического разряда в воде (кривая 1 на рис. 2), упругая деформация достигает 0,18 при общей деформации 0,25. Упругая деформация полиэтилена, находившегося под действием факторов разряда, достигает 0,11 при общей деформации 0,22 (кривая 2 на рис. 2). При этом наблюдается удлинение образцов после снятия нагрузки за счет релаксации напряжений материала. В результате конечная пластическая деформация образцов уменьшается в течение 30 минут еще на 0,04.

Полиэтилен, не находившийся под действием электрического разряда в воде, обладает существенной нелинейной упругостью, при которой модуль Юнга изменяется от 480 МПа при нулевой деформации до 87,96 МПа при предельной упругой деформации, приблизительно составляющей 0,11 (кривая 1 на рис. 2). Модуль Юнга полиэтилена, находившегося под действием электрического разряда в воде, изменяется в пределах от 265,4 МПа при нулевой деформации до 106,4 МПа при предельной упругой деформации, приблизительно равной 0,11 (кривая 2 на рис. 2). Упругая разгрузка и последующая нагрузка образца образуют на диаграмме петлю гистерезиса. Площадь петли составляет приблизительно 50% площади диаграммы при общей деформации 0,2, что свидетельствует о том, что энергия деформации расходуется на изменение структуры и рассеивается в материале, переходя в тепловую энергию.

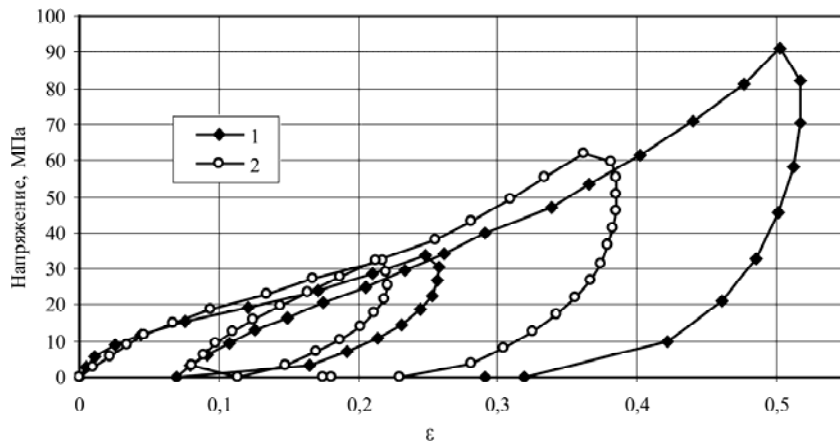


Рис. 2. Зависимость напряжения от деформации при статическом сжатии образцов. 1 – образец, не подвергавшийся воздействию факторов электрического разряда; 2 – образец, подвергавшийся воздействию.

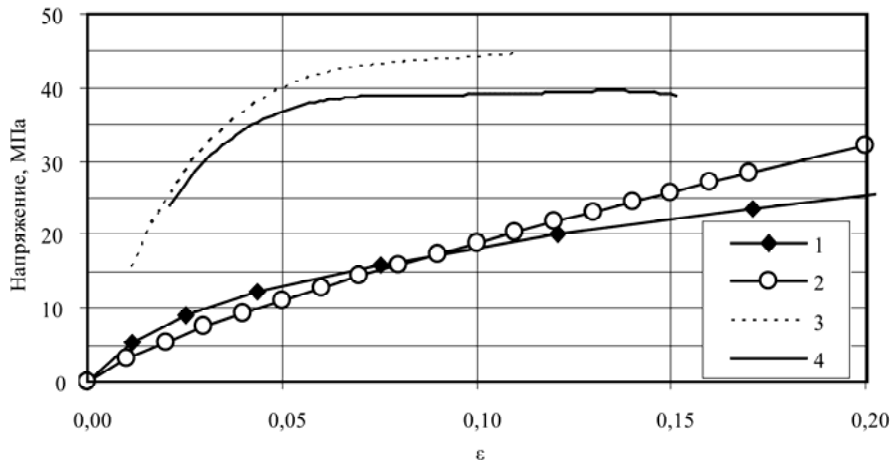


Рис. 3. Зависимость напряжения от деформации при динамическом и статическом нагружениях образцов: 1, 2 – статическое; 3, 4 – динамическое, скорость деформации 800 с^{-1} ; 1, 3 – без воздействия электрического разряда; 2, 4 – с воздействием.

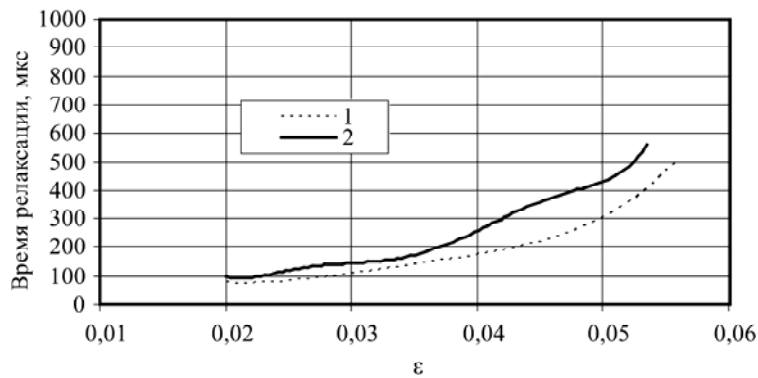


Рис. 4. Зависимость времени релаксации от деформации при динамическом нагружении. 1 – образец, не подвергавшийся воздействию факторов электрического разряда; 2 – образец, подвергавшийся воздействию.

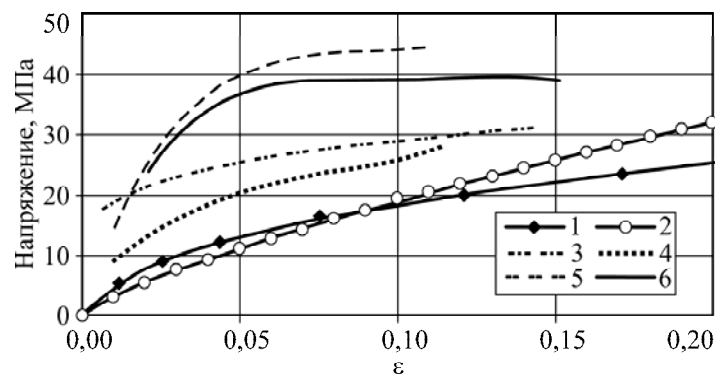


Рис. 5. Зависимость напряжения от деформации полиэтилена высокого давления. Линии 1, 2 – статическое нагружение при температуре, 25°C . Линии 3, 4 – динамическое нагружение при температуре, 25°C , а линии 5, 6 – при 3°C .

Динамические испытания образцов диаметром 14 ± 1 мм и длиной 13 ± 1 мм проведены на экспериментальной установке по методу Гопкинсона-Кольского [9–11] при температуре окружающей среды от 3 до 5°C . Величина давления ударной волны от канала разряда, воздействующая на полиэтилен, достигает 200 МПа, что сравнимо с давлением нагружающего стержня на образец, испытываемый на динамической установке. Результаты испытаний приведены на рис. 3.

В процессе динамического нагружения наблюдается значительное увеличение напряжений в образце. Например, при скорости деформации 800 с^{-1} напряжения превышают статические в пределах от 1,5 до 4 раз. Такое увеличение напряжений свидетельствует о большой степени неравновесности процесса перестройки структуры материала, что подтверждается величиной времени релаксации касательных напряжений, изменяющейся от 100 до 500 мкс в процессе деформации (рис. 4), сравнимой с временем деформирования образцов (200 мкс).

При динамических испытаниях также было выявлено, что понижение температуры образцов от 25 до 3°C приводит к увеличению напряжений приблизительно в 2 раза (рис. 5). На рисунке четными номерами обозначены линии, соответствующие образцам, которые подвергались воздействию факторов электрического разряда, а нечетными – без воздействия электрического разряда. В отличие от статического деформирования при динамическом деформировании полиэтилен упрочняется существенно меньше (угол наклона кривых на динамических диаграммах «напряжение деформации» на порядок меньше, чем на статических диаграммах).

ВЫВОДЫ

1. Динамические напряжения в полиэтилене при скорости деформации 800 с^{-1} превышают напряжения статического деформирования в пределах от 1,5 до 4 раз. Учитывая, что такие скорости деформации полиэтиленовой изоляции возникают под действием ударных волн, генерируемых электрическим разрядом в воде, можно утверждать, что механические свойства полиэтиленовой изоляции при динамическом нагружении существенно отличаются от их статических характеристик.

2. Динамическое деформирование полиэтилена под действием ударных волн, генерируемых электрическим разрядом в воде, происходит в неравновесных условиях, что подтверждается большим временем релаксации касательных напряжений (от 100 до 500 мкс) по сравнению с временем деформирования образцов (200 мкс).

3. При динамическом деформировании полиэтилена существенно повышается его текучесть по сравнению со статическим деформированием (упрочнение полиэтилена на порядок меньше, чем при статическом деформировании).

4. Температура значительно влияет на механические свойства полиэтилена, при ее понижении от 25 до 3°C наблюдается повышение прочности материала приблизительно в 2 раза.

5. Предельная упругая деформация полиэтилена при статическом деформировании составляет 0,13–0,18 и 0,1 – при динамическом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юткин Л.А. *Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности*. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.
2. Кривицкий Е.В. *Динамика взрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
3. Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. М.: Наука, 1977. 155 с.
4. Косенков В.М. Влияние длины канала высоковольтного разряда в воде на эффективность пластического деформирования цилиндрической оболочки. *Журнал технической физики*. 2011, **81**(10), 133–139.
5. Александров П. А. Механические свойства материалов в магнитном поле. *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез*. 2006, (1), 24–30.
6. Слуцкер А.И. Влияние механического нагружения на кинетику электрического разрушения полимеров. *Журнал технической физики*. 2008, **78**(11), 60–63.
7. Гуль В.Е., Кулезнев В.Н. *Структура и механические свойства полимеров*. Учеб. для хим.-технолог. вузов., 4-е изд., перераб. и доп. М.: Лабиринт, 1994. 367 с.
8. Кабанов В.А. *Энциклопедия полимеров в 3-х т.* Т. 2. М.: Советская энциклопедия, 1977. 1032 с.
9. Косенков В.М., Бычков В.М., Сокол С.В., Каменская Л.А. Методика определения внутренней энергии и количества выделившегося тепла в процессе динамического деформирования алюминиевых сплавов. *Материалы IX Международной научной конференции "Импульсные процессы в механике сплошных сред"*. Николаев, 2011. С. 183–186.
10. Кольский Г. *Волны напряжения в твердых телах*. М.: Иностранная литература, 1955. 195 с.
11. Брагов А.М., Ломунов А.К. Использование метода Кольского для динамических испытаний конструкционных материалов. *Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб.* Нижний Новгород, Нижегородский ун-т. 1995, (51), 127–137.

Поступила 07.06.12

Summary

Under examination are changes, caused by the impact of a shockwave generated during an electrical discharge in water, of mechanical properties of high pressure polyethylene used as a high-voltage insulator. The study is based on dynamic and static properties of polyethylene; its rheological characteristics are also considered. Significant difference between dynamic and static characteristics of polyethylene is highlighted, as well as the necessity to

consider these features when choosing high-voltage insulation to be affected by shockwave generated by an electrical discharge in water.

Keywords: electrical discharge in water, dynamic and static properties of polyethylene, split Hopkinson (Kolsky) bar.