



ВОЗДЕЙСТВИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ I РОДА В КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ ПОЛИМЕРАХ (ОБЗОР)

В.В. Постников

Воронежский государственный лесотехнический университет
394613 Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8
E-mail: vvpost45@mail.ru

Заключение совета рецензентов: 07.03.15 Заключение совета экспертов: 11.03.15 Принято к публикации: 15.03.15

Представлен обзор работ, посвященных исследованию магнитокристаллизационных эффектов, возникающих в полимерах, имеющих в молекулярных цепях слабые двойные связи и радикальные концевые группы. Согласно приведенной качественной модели действие слабых (менее 0,5 Тл) импульсных и постоянных магнитных полей сводится к изменению спинового состояния радикальных пар (переходы типа триплет-синглет), что, в свою очередь, стимулирует протекание реакций, запрещенных по спину в исходном состоянии. В результате меняется морфология полимеров и связанное с этим изменение у них температур кристаллизации и плавления.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, полимерные цепи, межмолекулярные связи, поляризация, деполяризация, кристаллизация, плавление, нуклеация, радикальная пара, синглет-триплетные переходы, селективность, фракционирование, полиэтиленоксид, термограмма.

THE IMPACT OF WEAK MAGNETIC FIELDS ON FIRST-ORDER PHASE TRANSITIONS IN CRYSTALLIZING POLYMERS

V.V. Postnikov

Voronezh State University of Forestry Engineering
8 Timiryaseva str., Voronezh, 394613, Russia
E-mail: vvpost45@mail.ru

Referred: 07.03.15 Expertise: 11.03.15 Accepted: 15.03.15

The overview of studies on the magnetic crystallization effects occurring in a polymer having a molecular chains weak double bonds and free radical groups has been presents. According to the above qualitative model of action weak permanent and pulsed magnetic field (less than 0.5 T) is reduced to a change in the spin state of radical pairs (transitions of the triplet-singlet), which in turn stimulates the reaction, spin-forbidden in the initial state. As a result, the morphology, crystallization and melting temperatures of the polymers are changing.

Keywords: pulsed magnetic field, the polymer chains, the intermolecular bonds, polarization, depolarization, crystallization, melting, nucleation, radical pair, singlet-triplet transitions, selectivity, fractionation, polyethylene oxide, thermogram.



Валерий
Валентинович
Постников
Valery V. Postnikov

Сведения об авторе: д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры общей и прикладной физики Воронежского государственного лесотехнического университета.

Образование: Воронежский политехнический институт (ВПИ) по специальности «Физика металлов» (1968). Инженер-металлофизик.

Область научных интересов: фазовые превращения, воздействие постоянных и импульсных магнитных полей на физические свойства диамагнитных материалов.

Публикации: более 200.

Author information: Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor of the Department of General and Applied Physics, Voronezh State University of Forestry Engineering.

Education: Voronezh Polytechnic Institute (VPI) graduate with honors in 1968. «The Physics of Metals».

Main research interests: phase transformations, effect of continuous and pulsed magnetic fields on the physical properties of diamagnetic materials.

Publications: more than 200.

Введение

Давно известно и понятно заметное влияние слабых¹ магнитных полей (МП) на физические свойства магнитоупорядоченных материалов [1]. Что касается влияния таких полей на диамагнитные материалы, то здесь далеко не все понятно; более того, сообщения о подобном влиянии зачастую подвергаются сомнению. Широко распространено мнение, что слабое МП в принципе не в состоянии существенно повлиять на структуру и свойства немагнитных твердых тел. Действительно, в термодинамически равновесных системах в МП с индукцией $B \sim 1$ Тл можно рассчитывать лишь на эффекты $(\mu_B B/kT) \sim 10^{-3}$ (для температур порядка комнатных), что значительно меньше типичных погрешностей измерений при исследовании тех или иных свойств. Тем не менее, в 60-80-х годах прошлого столетия был обнаружен ряд магнитных эффектов в люминесцентных [2-4], фотоэлектрических [5-8] и радиоскопических [9-14] исследованиях различных диамагнитных кристаллов, реальность которых была многократно подтверждена независимыми исследованиями.

В 80-90-х годах был обнаружен и исследован в монокристаллах NaCl так называемый «магнитопластический эффект» [15-18]. Впоследствии существование подобных эффектов было подтверждено не только в NaCl, но также и в других диамагнитных материалах: LiF, KCl, KBr, CsI, InSb, Al, Zn, Si, NaNO₃, ZnS, C₆₀ и многих других. Кроме того, было обнаружено множество родственных явлений, сводящихся к существенному влиянию МП на различные физико-механические и другие структурно-чувствительные характеристики немагнитных материалов [19-28]. Использовались постоянные, переменные, импульсные и микроволновые МП, практически весь арсенал методик исследования микроструктуры и физических свойств, различные температурные диапазоны.

В обработанных слабыми постоянными и импульсными МП аморфных и кристаллизующихся полимерах также были обнаружены изменения физических (в основном механических) свойств (см., например, [29-34]). Воздействие объяснялось ориентационными эффектами, обусловленными анизотропией диамагнитной восприимчивости полимерных цепей, а также наличием внутренних магнитных полей, локализованных в малых упорядоченных областях полимера («физических узлах») с нехимическим взаимодействием между молекулярными группами соседних полимерных цепей.

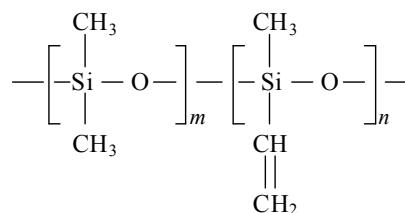
Проведенные нами исследования воздействия слабых импульсных и постоянных МП на физические свойства вблизи фазовых переходов I рода в кристаллизующихся полимерах также обнаружили

ряд новых эффектов, не находящихся объяснения с точки зрения равновесной термодинамики.

Рассмотрению этих эффектов и посвящена настоящая работа.

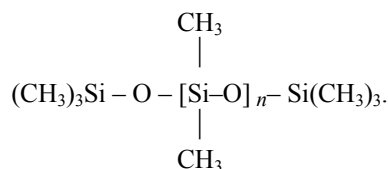
Воздействие слабого импульсного магнитного поля на процессы кристаллизации и плавления кремнийорганических полимеров

Характерной особенностью синтетического каучука СКТВ-1, который представляет собой модифицированный полидиметилсилоксан, является наличие в его молекулярной цепи метилвиниловых звеньев с двойными связями $\text{CH}=\text{CH}_2$ [35]:



Этот полимер имеет молярную массу $\text{MM} = 6 \cdot 10^5$ кг/кмоль, характеризуется высокой подвижностью линейных молекулярных цепей, кристаллизуется при температурах ~ 190 К, а концевые звенья его являются радикалами.

У второго, также гибкоцепного кремнийорганического полимера – полиметилсилоксана ПМС800000 (с молярной массой $\text{MM} = 8 \cdot 10^5$ кг/кмоль, то есть того же порядка, что и у СКТВ-1), кристаллизующегося при чуть более высоких (~ 200 К) температурах, в цепи отсутствуют двойные связи, а концевые звенья его представляют собой триметилвые группы [36]:



Процессы кристаллизации и плавления полимеров сопровождаются возникновением поляризованного состояния [37], что позволило использовать для изучения влияния импульсных магнитных полей (ИМП) на кинетику фазовых превращений I рода этих полимеров метод измерения токов поляризации и деполяризации [38].

Поляризованное состояние полимеров возникало при их кристаллизации (плавлении) в неоднородном температурном поле [39].

Экспериментальные температуры кристаллизации и плавления образцов СКТВ-1 и ПМС определялись по положениям максимумов токов термостимулированной поляризации и деполяризации соответственно. Справедливость такой идентификации были подтверждена термограммами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [40].

¹ Магнитное поле считается слабым, если выполняется условие: $\mu_B B \ll kT$, где μ_B – магнетон Бора; B – индукция магнитного поля; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

Обработка образцов ИМП осуществлялась сериями до $N \sim 3000$ импульсов практически треугольной формы с одинаковыми длительностями переднего и заднего фронтов $\tau \sim 10$ мкс, варьируемой амплитудой $B \leq 0,3$ Тл и частотой следования 10 мс [41]. Воздействие ИМП проводилось при 2 температурах – комнатной (300 К), когда полимеры находились в расплавленном состоянии, и жидкого азота (77 К), т.е. ниже температуры кристаллизации. Кроме того, образцы подвергались обработке сериями электрических импульсов с теми же частотными характеристиками и амплитудой напряженности $E \sim 2,5 \cdot 10^5$ В/м, а также постоянным магнитным полем с индукцией $B \sim 0,3$ Тл в течение 24 часов.

На рис. 1 приведены температурные зависимости плотности токов поляризации j_k и деполяризации j_n , а на рис. 2 – термограммы ДСК для образцов СКТВ-1 до (кривые 1) и после (кривые 2) обработки ИМП. Практически полное совпадение температурного положения основных максимумов поляризационных токов и соответствующих тепловых потоков позволяет идентифицировать положения пиков $j(T)$ со значениями экспериментальных температур плавления $T_{пл}$ и кристаллизации $T_{кр}$ полимера.

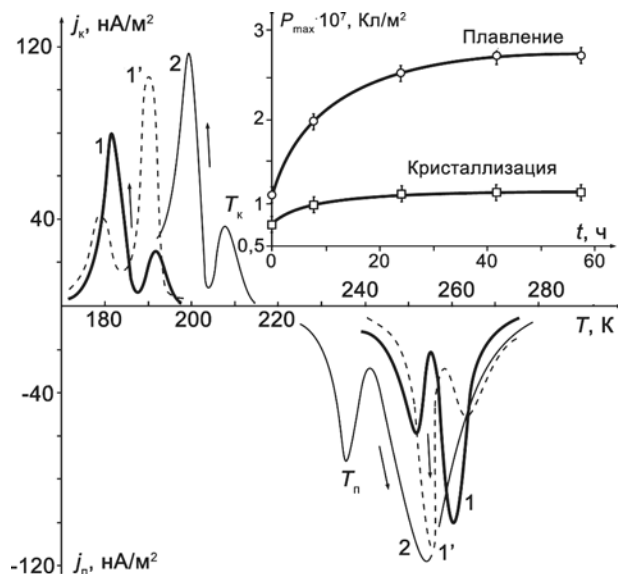


Рис. 1. Термограммы плотностей токов поляризации j_k и деполяризации j_n при кристаллизации и плавлении образца СКТВ-1: 1 – исходные; 1' – через 1 ч после ИМП-воздействия; 2 – через трое суток после воздействия.

На вставке: зависимости величин интегральной поляризованности от времени выдержки расплава СКТВ-1 после обработки ИМП.

Режим обработки: $B_0 = 0,2$ Тл; $t = 30$ с; $T = 300$ К [40]

Fig.1. Thermogram of current density j_k polarization and depolarization j_n during crystallization and melting of the high molecular weight silicone (СКТВ-1):

1 – the original; 1' – 1 hour after pulsed magnetic field (PMF)-action; 2 – three days after PMF-action. The inset shows the dependence of the integral polarized on the exposure time of the melt SKTV-1 after treatment of pulse.

Processing mode: $B_0 = 0.2$ T; $t = 30$ s; $T = 300$ K [40]

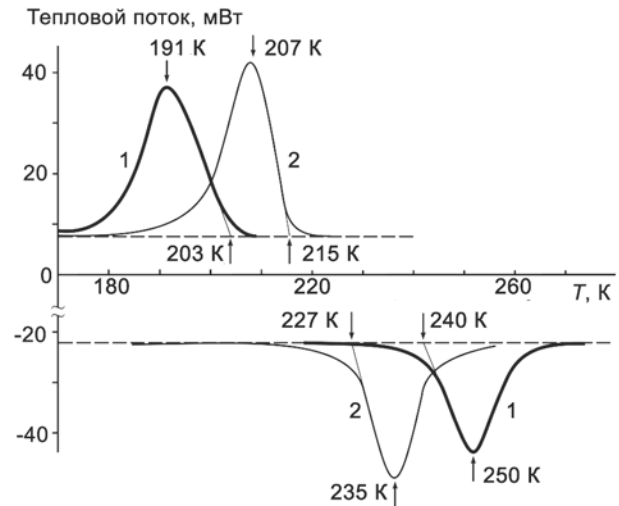


Рис. 2. Термограммы ДСК при охлаждении и нагревании образца СКТВ-1: 1 – исходные; 2 – спустя 72 ч после воздействия ИМП ($N = 1500$; $B_0 = 0,2$ Тл) [42]

Fig. 2. Thermogram of DSC obtained by heating and cooling of the СКТВ-1: 1 – the original; 2 – 72 hours after PMF-action ($N = 1500$; $B_0 = 0.2$ T) [42]

Характерным для исходных образцов СКТВ-1 является наличие двух максимумов (кривые 1), что может быть проявлением полиморфизма полимера, способного кристаллизоваться в двух модификациях. В результате предкристаллизационной ИМП-обработки расплава СКТВ-1 происходит изменение соотношения интенсивностей этих максимумов (кривые 1'), причем характер изменения зависит от выдержки образца в расплавленном состоянии перед кристаллизацией после обработки ИМП. При малых (часы) временах выдержки ИМП-обработанного расплава перед кристаллизацией имеет место изменение соотношения интенсивностей исходных максимумов без их температурного смещения (кривая 1'). При больших временах (более суток) соотношение интенсивностей максимумов близко к исходному, однако положения максимумов оказываются смещенными по температуре навстречу друг другу (кривые 2). Величина смещения температур плавления и кристаллизации $T = (T_{пл} - T_{кр}) - (T_{пл0} - T_{кр0})$ (в первую скобку выражения для T входят предельные значения $T_{пл}$ и $T_{кр}$, достигнутые в результате магнитной обработки, а во вторую – исходные значения $T_{пл0}$ и $T_{кр0}$ необработанного полимера) примерно через 48 часов в дальнейшем не меняется со временем.

Наблюдающееся увеличение высоты максимумов поляризационных и деполяризационных токов (по сравнению с исходными) свидетельствует о достижении большей степени кристалличности образцов полимера при их кристаллизации после предварительной обработки расплава ИМП.

В результате ИМП-воздействия величина интегральной поляризованности P_{max} (пропорциональная площади под кривой $j(T)$), соответствующая

процессам плавления и кристаллизации полимера, оказывается неодинаковой, причем их разница, как видно из вставки к рис. 1, растет со временем выдержки образца после ИМП-воздействия. Первая точка на этом графике соответствует исходному образцу и указывает на близость значений зарядов поляризации и деполяризации при отсутствии предкристаллизационной обработки. Обнаруженный эффект указывает на то, что в результате предкристаллизационного воздействия ИМП на полимер его упорядочение частично происходит уже в расплавленном состоянии, что может быть связано с действием на образец неоднородного температурного поля. Такое упорядочение структуры расплава можно рассматривать как фазовый переход типа беспорядок-порядок [43], для которого термодинамический потенциал Φ вблизи температуры перехода T_k можно представить в виде

$$\Phi = \Phi_0 - (T - T_k) + \xi^2 + \dots, \quad (1)$$

где α и β – постоянные; ξ – параметр упорядочения (характеризуемый отношением n_i/n_0 , где n_0 – количество неупорядоченных, а n_i – упорядоченных макромолекул), который можно выразить через α и β , используя условие существования устойчивости системы при температуре T_k , т.е. $\partial\Phi/\partial\xi = 0$, что с учетом (1) дает

$$\xi = \frac{\alpha(T - T_k)}{2\beta}. \quad (2)$$

В точке перехода теплота равна нулю ($\Delta S = 0$). Но по обе стороны от T_k , если обозначить энтропию в неупорядоченном и упорядоченном состояниях через S_0 и S , теплоты соответствующих фаз можно выразить в виде $Q_0 = S_0T_0$ и $Q = ST$, и, следовательно, разность $\Delta Q = ST - S_0T_0$. Из (1) следует, что $S = S_0 - \alpha\xi$. С учетом этого получим

$$-\Delta T = \frac{\alpha}{c_p - S_0} \xi T. \quad (3)$$

Ввиду того, что правая часть соотношения (3) положительна ($c_p > S_0$; $\alpha > 0$; $\xi > 0$), переход типа беспорядок-порядок в расплаве полимера должен сопровождаться понижением температуры. Такой ΔT -эффект действительно был отмечен для расплава полиэтилена [44]. Понятно, что такое упорядочение в расплаве должно оказывать влияние на кинетику процесса кристаллизации полимера.

Итак, кратковременное воздействие ИМП вызывает увеличение $T_{кр}$ и снижение $T_{пл}$, т.е. значительное сближение этих температур ($\Delta T \sim 30$ К). Динамика изменения $T_{кр}$ и $T_{пл}$ представлена на рис. 3 (кривые 1 и 2). Важно отметить, что обнаруженный эффект ИМП-индуцированного изменения температур структурных фазовых переходов СКТВ-1 имеет устойчивый характер, т.е. значения $T_{кр}$ и $T_{пл}$ обрабо-

танных ИМП образцов после двухсуточной выдержки (в течение которой наблюдалось плавное понижение $T_{пл}$ и возрастание $T_{кр}$) не меняются со временем (1500 и более часов), несмотря на многократные повторения циклов кристаллизации и плавления.

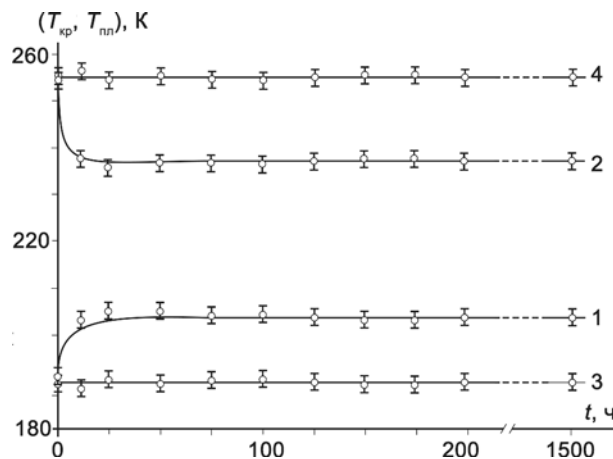


Рис. 3. Временные зависимости температур $T_{кр}$ (1) и $T_{пл}$ (2) СКТВ-1 после воздействия ИМП ($B_0 = 0,2$ Тл; $N = 1500$) и ПМП с $B_0 = 0,3$ Тл (3 и 4) [40]
Fig. 3. Time dependences of temperature $T_{кр}$ (1) and $T_{пл}$ (2) of the СКТВ-1 after Pulse-action ($B_0 = 0.2$ T; $N = 1500$) and constant magnetic field (CMF) with $B_0 = 0.3$ T (3 and 4) [40]

Эффект изменения $T_{кр}$ и $T_{пл}$ зафиксирован для образцов СКТВ-1, обработанных ИМП при комнатной температуре. Воздействия ИМП на величину $T_{кр}$ и $T_{пл}$ в образцах, подвергнутых обработке при температуре жидкого азота, не обнаружено. Постоянное магнитное поле с индукцией $B \sim 0,3$ Тл, действующее в течение длительного (до 24 часов) времени, лишь незначительно увеличивало (на $\leq 2-3$ К) обе температуры $T_{кр}$ и $T_{пл}$, не приводя к их относительному изменению (см. кривые 3 и 4 на рис. 3).

Воздействие на образцы СКТВ-1 импульсов электрического поля с длительностью фронтов $\tau \sim 10$ мкс, частотой следования 10 мс и напряженностью до $E \sim 2,5 \cdot 10^5$ В/м, не приводило к каким-либо изменениям температурных зависимостей токов поляризации и деполяризации, возникающих при кристаллизации и плавлении полимера.

На рис. 4 приведены термограммы токов поляризации и деполяризации для образца ПМС800000, обработанного ИМП при комнатной температуре в таких же режимах, как и для образцов СКТВ-1. Как видим, положения температур $T_{кр}$ и $T_{пл}$ после ИМП-воздействия практически не меняются (см. вставку к рис. 4). Такое же поведение обнаружили все образцы ПМС800000, обработанные при температурах 300 и 77 К разными по длительности и амплитуде ИМП, а также постоянным магнитным и импульсным электрическим полями.

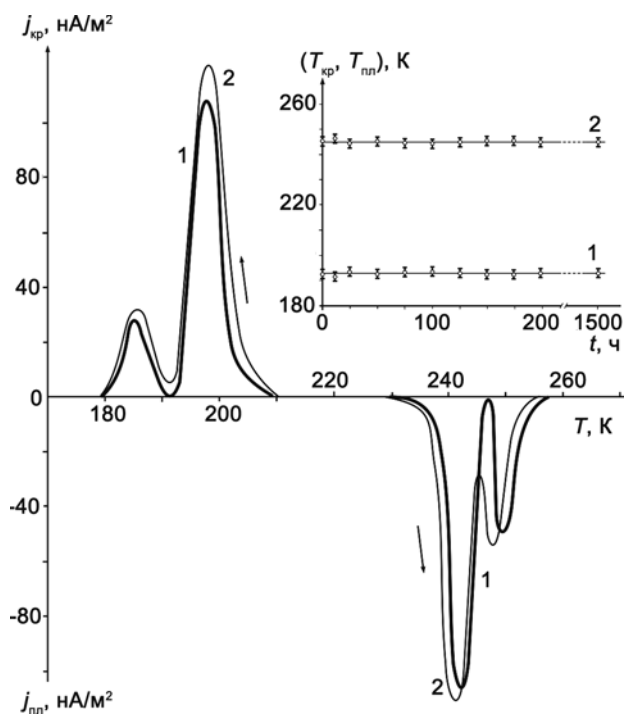


Рис. 4. Термограммы плотностей токов поляризации и деполяризации при кристаллизации и плавлении образца ПМС800000: 1 – исходные; 2 – через 48 часов после ИМП-воздействия ($B_0 = 0,2$ Тл; $N = 1500$). На вставке: временные зависимости температур кристаллизации $T_{кр}$ (1) и плавления $T_{пл}$ (2) для этого же образца [40]

Fig. 4. Thermogram of current density polarization and depolarization during crystallization and melting of the methylpolysiloxane (PMS800000): 1 – the original; 2 – 48 hour after PMF-action ($B_0 = 0.2$ T; $N = 1500$). The inset shows the time dependence of the temperature [40]

Известно (см., например, работу [37]), что температура кристаллизации линейных кремнийорганических полимеров увеличивается с ростом их вязкости и средней молекулярной массы ММ. Это объясняется уменьшением подвижности полярных звеньев Si-O с увеличением длины полимерных цепей, ослабляющим тепловую разориентацию диполей Si-O при их поляризации в процессе кристаллизации полимера. Известно также, что с увеличением средней молекулярной массы меняются характер нуклеации и кинетика кристаллизации полимера, с переходом от образования и роста отдельных крупных сферолитов при низких значениях ММ к равномерному зарождению более мелких кристаллитов, образующих сплошное кристаллическое поле при высоких ММ [45]. Уменьшение же размеров кристаллитов приводит к понижению температуры плавления за счет большего вклада поверхностной энергии кристаллитов меньших размеров в процесс их разупорядочения [46]. То есть обнаруженные эффекты ИМП-индуцированного повышения температуры кристаллизации и уменьшения температуры плавления СКТВ-1 можно связать с увеличением длины его полимерных цепей и, следовательно, с увеличением его молекулярной массы. Это может быть обусловлено влияни-

ем слабых магнитных полей на радикальные химические реакции. Как известно, это влияние связано со снятием спиновых запретов на переходы между состояниями различной мультиплетности, обладающими существенно различной реакционной способностью [47-49].

Как уже отмечалось, концевые звенья полимерных цепей СКТВ-1 являются радикалами. В расплавленном состоянии они могут обладать подвижностью, достаточной для сближения и формирования радикальных пар. При этом вероятность реакции радикальной пары с образованием химической связи определяется ее мультиплетностью.

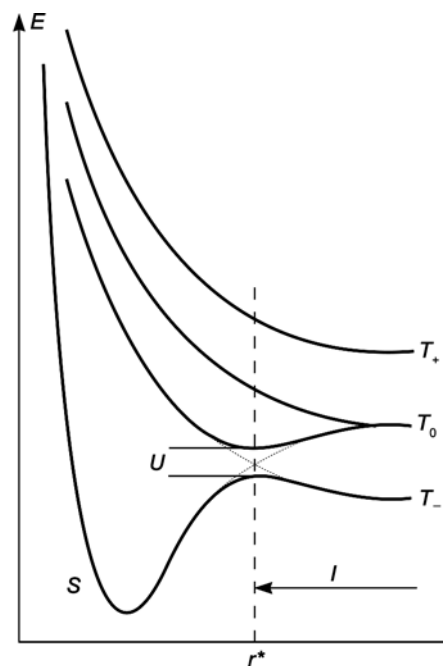


Рис. 5. Схематическое изображение синглетных и триплетных термов радикальной пары в магнитном поле. Тонкими линиями показаны неадиабатические пути прохождения области квазипересечения $S - T$ состояний. Стрелкой I отмечена область r , сканируемая точкой квазипересечения с S и T термами при воздействии магнитного импульса амплитудой B_0 [52]

Fig. 5. Schematic representation of the singlet and triplet terms of a radical pair in a magnetic field. Thin lines show the nonadiabatic path of the region quasicrossings $S - T$ states. Arrow I denotes the region r , scanned point of quasicrossings with the S and T terms when exposed to a magnetic pulse amplitude B_0 [52]

Качественно влияние ИМП на вероятность синглет-триплетных переходов в радикальной паре, образованной концевыми группами двух полимерных цепей ПДМС, можно представить следующим образом. На рис. 5 условно изображены синглетный S и триплетный T_- электронные термы радикальной пары в зависимости от межрадикального расстояния r . Магнитное поле вызывает зеемановское расщепление триплетного терма на три компоненты T_- , T_0 , T_+ и пересечение термов S и T_- . На рис. 5 отмечен ин-

тервал междирадикальных расстояний, на котором происходит пересечение T_- и S термов в ИМП. Нижняя граница этого интервала определяется амплитудным значением индукции магнитного поля B_0 из условия

$$\frac{1}{2}(g_1 + g_2)\mu_B B_0 = 2|J(r)|, \quad (4)$$

где g_1 и g_2 – гиромагнитные факторы электронов, образующих молекулярную связь; μ_B – магнетон Бора; J – энергия обменного взаимодействия электронов в радикальной паре, определяемая междирадикальным расстоянием r .

Как известно, вырождение в точке пересечения термов снимается, а ослабление обменного взаимодействия, фиксирующего спины неспаренных электронов, создает возможность интеркомбинационных переходов во внешнем магнитном поле [51].

Вероятность $S - T_-$ переходов в магнитном поле для свободных радикалов в растворах оценивалась в [50] на основе уравнения Ландау – Зинера для вероятности адиабатических переходов, широко используемого в теории атомных столкновений [51]. Вероятность адиабатического прохождения области квазипересечения термов определялась параметром $U\chi\tau$, где U – энергия расхождения термов; τ – эффективное время прохождения частицами области квазипересечения. Оценка величины параметра $U\chi\tau \sim 0,1-1$ для СКТВ-1 (с учетом соответствующего значения вязкости расплава) свидетельствует о возможности адиабатических $S - T_-$ переходов для радикальных пар, образованных концевыми звеньями полимерных цепей в расплаве этого полимера.

Интересно отметить, что постоянное магнитное поле с индукцией 0,3 Тл на образцы СКТВ-1 не оказывало практически никакого воздействия, что связано с неизбежным разбросом междирадикальных расстояний в расплавленном полимере [40]. Изменение магнитной индукции от нуля до B_0 при воздействии ИМП обеспечивает достижение условия резонанса (квазипересечения $S - T_-$ термов, при котором возможно их перезаселение) для любого междирадикального расстояния r в пределах области, ограниченной снизу условием (4). В постоянном же магнитном поле B_0 резонанс S и T_- состояний возникает в единственной точке r , определяемой условием (4).

При низких температурах в кристаллическом СКТВ-1 может не оказаться близко расположенных концевых звеньев полимерных цепей, способных к образованию радикальных пар. Именно по этой причине не наблюдается изменений $T_{кр}$ и $T_{пл}$ у образцов, обработанных ИМП при температуре жидкого азота.

Отсутствие каких-либо эффектов при воздействии на СКТВ-1 импульсного электрического поля свидетельствует о том, что наблюдавшиеся ИМП-индуцированные эффекты не связаны с действием электрических полей, индуцируемых меняющимся во времени магнитным полем.

Уменьшение подвижности звеньев Si-O полимера (и, следовательно, изменение температур его фазовых превращений) можно связать также с инициированным ИМП сшиванием полимерных цепей через группы с двойными связями. Действительно, электрическое поле, неизбежно сопровождающее изменяющееся во времени магнитное, может способствовать разрыву слабой π -связи в двойной связи $HC=CH_2$ виниловой группы СКТВ-1, обладающей отличным от нуля дипольным моментом. В результате образуется группа с двумя неспаренными электронами $\dot{HC}-\dot{CH}_2$. Исходное состояние группы является синглетным, поскольку характеризуется нулевым спином. В отсутствие внешнего магнитного поля спиновое состояние группы измениться не может, поэтому даже случайно разорванная π -связь быстро восстановится. ИМП, однако, индуцирует синглет-триплетные $S-T$ переходы за счет разности гирофакторов электронов углеродных атомов групп CH и CH_2 . В результате таких переходов вероятность восстановления двойной связи уменьшается и возрастает вероятность других спин-зависимых реакций. Например, ИМП может стимулировать взаимодействие триплетной виниловой группы с триплетной же молекулой кислорода с образованием перекисного мостика $\begin{matrix} O & O \\ | & | \\ HC & -CH_2 \end{matrix}$. Затем под действием

электрической составляющей ИМП разрывается слабая π -связь в перекисном мостике, образуя активный радикал $\begin{matrix} O & \bullet & O \\ | & & | \\ HC & -CH_2 \end{matrix}$, способный к дальнейшим химическим

взаимодействиям по радикальному механизму, чувствительному к внешним магнитным полям. Это может быть, например, реакция активированного перекисного мостика с триплетной виниловой группой другой полимерной цепи. Кроме того, ИМП индуцированное образование сшивок через виниловые группы может происходить и непосредственно, без промежуточных стадий с участием молекулярного кислорода. Подробнее схемы возможных реакций изображены на рис. 6.

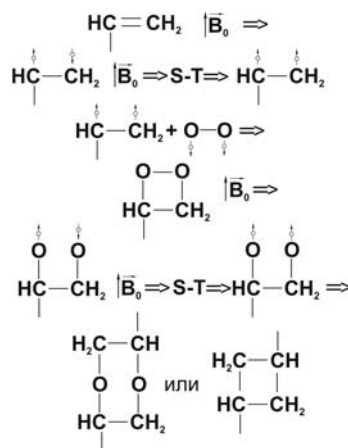


Рис. 6. Схема возможных переходов в виниловой группе СКТВ-1 в ИМП
Fig. 6. Scheme of possible transitions in the vinyl group of the CKTV-1 after PMF-action

Отсутствие эффекта ИМП-воздействия на образцы ПМС, у которых нет двойных связей в полимерной цепи и радикальных концевых групп, подтверждает справедливость предложенной выше качественной модели, согласно которой изменение температур фазовых превращений в СКТВ-1 связано с действием двух рассмотренных механизмов.

Магнитокристаллизационный эффект в полиэтиленоксидах

Подобно СКТВ-1 полиэтиленоксид (ПЭО) $[-CH_2CH_2O-]_n$ имеет высокую (до 95%) степень кристалличности, его линейные цепи характеризуются высокой конформационной гибкостью и подвижностью в расплаве, звенья основных цепей обладают дипольным моментом, а концевые группы являются радикалами [52]. Температура кристаллизации ПЭО расположена в интервале $\sim 300-310$ К, что позволяет наблюдать и фиксировать основные этапы этого процесса непосредственно в оптическом микроскопе МБС-2.

Для определения температур кристаллизации $T_{кр}$ и плавления $T_{пл}$ образцов ПЭО наряду с методами измерения токов ТСП и ТСД использовались также методы измерения диэлектрической проницаемости ϵ' , электрической проводимости σ и дифференциального термического анализа (ДТА) [53, 54]. Исследовались образцы ПЭО молекулярной массой $MM = 100 \cdot 10^3$ (ПЭО-100) и $40 \cdot 10^3$ (ПЭО-40) кг/кмоль.

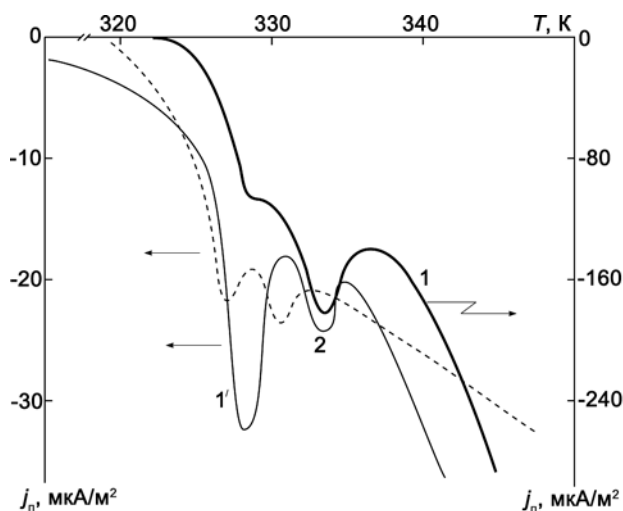


Рис. 7. Термограммы плотностей токов деполяризации при плавлении образцов ПЭО-100:

1 – исходного (ось j_n справа); 1' и 2 – для образцов, закристаллизованных через 20 мин и через 3 часа после ИМП-обработки соответственно.

Для кривых 1' и 2 ось j_n слева [56]

Fig. 7. Thermogram of current density polarization during melting of the polyethylene oxide (PEO-100): 1 – the original (the j_n -axis to the right); 1' and 2 – for samples crystallized after 20 minutes and 3 hours after PMF treatment, respectively. For curves 1' and 2 j_n -axis on the left [56]

Температурная зависимость токов деполяризации исходного образца ПЭО-100, представленная на рис. 7, как и у СКТВ-1, имеет вид двух перекрывающихся максимумов (кривая 1). Предкристаллизационная ИМП-обработка расплава ПЭО-100 приводит к разрешению этих двух максимумов. Для образцов, кристаллизованных сразу после воздействия ИМП, имело место резкое возрастание меньшего (побочного) пика (кривая 1') без смещения температуры обоих максимумов. Для образцов, которые некоторое время после воздействия выдерживались в расплавленном состоянии, также происходило разрешение максимумов, но с меньшим возрастанием побочного пика. При этом оба максимума смещались в сторону более низких температур (кривая 2). Предельный температурный сдвиг максимумов достигался при выдержке ИМП-обработанных образцов при $T = 350$ К в течение трех (и более) часов.

В процессах кристаллизации и плавления наблюдалось скачкообразное изменение ϵ' и σ . Положения скачков полностью коррелировало с результатами измерений токов ТСД и ТСП и соответствовало температурам кристаллизации $T_{кр}$ и плавления $T_{пл}$ образцов.

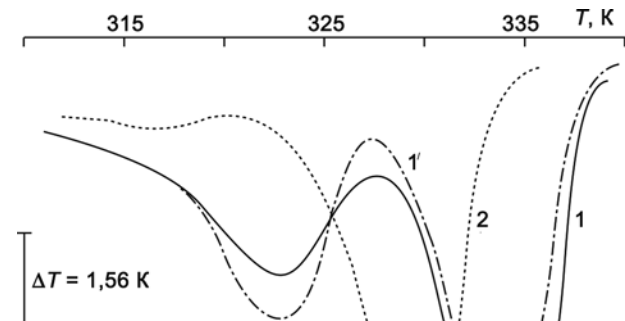


Рис. 8. Термограммы ДТА для процесса плавления образцов ПЭО-100: 1 – исходного; 1' – через 0,5 ч после ИМП-обработки; 2 – после выдержки обработанного ИМП расплава полимера в течение 3 ч [56]

Fig. 8. DTA thermogram in the melting process samples PEO-100: 1 – the original; 1' – 0.5 hour after PMF-action; 2 – 3 hour after PMF-action of the polymer melt [56]

На рис. 8 представлена термограмма ДТА для процесса плавления образца ПЭО-100. Характерным для термограмм исходных образцов является наличие двух максимумов, температурное положение которых совпадает с положениями пиков ТСД. Предкристаллизационная магнитная обработка образцов существенно меняет вид кривых ДТА. Для образцов, закристаллизованных сразу после ИМП-воздействия, наблюдалось перераспределение интенсивностей максимумов без изменения их темпера-

турного положения (кривая 1'), что также согласуется с результатами измерения токов ТСД. В случае же трехчасовой выдержки ИМП-обработанного полимера в расплавленном состоянии перед кристаллизацией и последующего повторного его плавления на термограммах ДТА наблюдается практически полное исчезновение меньшего пика и смещение основного максимума в сторону более низких температур (кривая 2).

Динамика сближения температур плавления $T_{пл}$ и кристаллизации $T_{кр}$ для образцов ПЭО-100 в зависимости от времени выдержки в расплавленном состоянии после ИМП-воздействия показана на рис. 9 [55].

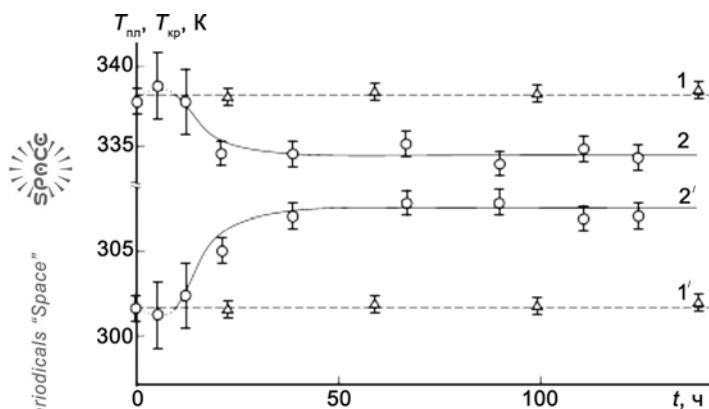


Рис. 9. Зависимость температур плавления (кривая 2) и кристаллизации (2') от времени выдержки после ИМП-воздействия для образцов ПЭО-100 (режим обработки: $N = 1500$; $B_0 = 0,2$ Тл; $T = 350$ К).

Кривые 1 и 1' – для необработанного образца [55]

Fig. 9. The dependence of melting (curve 2) and crystallization (2') of exposure time for the PEO-100 samples after PMF-action (mode processing: $N = 1500$; $B_0 = 0.2$ T; $T = 350$ K).

Curves 1 and 1' – untreated sample [55]

Понижение температуры плавления $T_{пл}$ ПЭО-100 в результате воздействия ИМП, как и для СКТВ-1, является необратимым, то есть не меняется со временем при многократном повторении процессов плавления и кристаллизации и, как упоминалось выше, может быть вызвано уменьшением размеров образующихся кристаллитов.

На рис. 10 представлены фотографии основных стадий кристаллизации образцов ПЭО-100 до (серия а) и после воздействия ИМП, при кристаллизации их сразу (через 20 мин) после воздействия (серия b) и с выдержкой полимера в расплавленном состоянии в течение 3 часов после его обработки ИМП (серия c). В результате воздействия меняется характер всех стадий кристаллизации. Без выдержки расплава полимера после ИМП-обработки концентрация центров нуклеации уменьшается и происходит рост сферолитов, более крупных по сравнению с необработанным образцом. При выдержке полимера после ИМП-обработки в расплавленном состоянии в течение нескольких часов число центров нуклеации увеличива-

ется, а размер образующихся при кристаллизации сферолитов уменьшается. Последний результат прямо подтверждает предположение о том, что понижение температуры плавления полимеров в результате воздействия ИМП обусловлено уменьшением размеров образующихся кристаллитов.

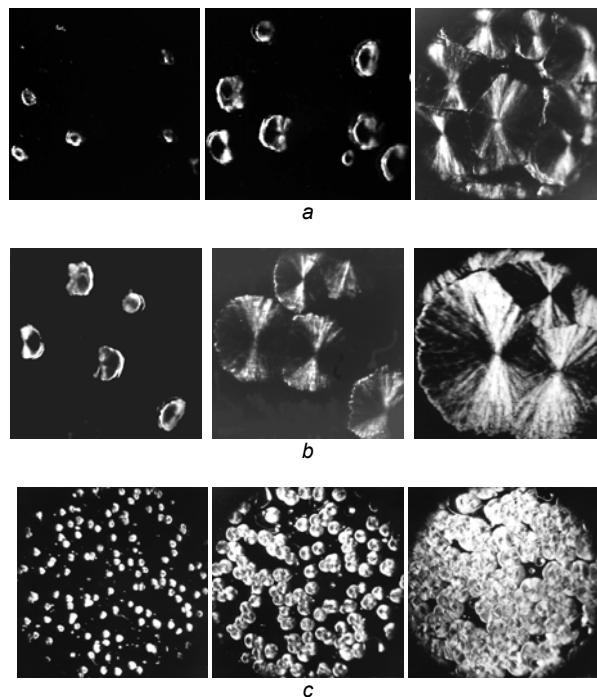


Рис. 10. Этапы кристаллизации образца ПЭО-100: а – исходного; b – через 20 минут после ИМП; c – после 3-часовой выдержки обработанного образца в расплавленном состоянии. Размер каждой фотографии 7×7 мм [56]
Fig. 10. The stages of crystallization of the sample PEO-100: a – the original; b – 20 minutes after PMF-action; c – after a 3-hour exposure of the treated sample in a molten state. The size of each photo 7×7 mm [56]

Результаты исследований полиэтиленоксида с молярной массой $40 \cdot 10^3$ кг/кмоль (ПЭО-40), обработанного при тех же режимах, что и ПЭО-100, обнаруживают аналогичные закономерности, однако сближение температур кристаллизации $T_{кр}$ и плавления $T_{пл}$ у этого полимера оказывается существенно меньшим ($\Delta T \sim 4-5$ К), чем для ПЭО-100 ($\Delta T \sim 10-12$ К).

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что высокомолекулярные соединения СКТВ-1 и ПЭО проявляют одинаковые изменения характера кристаллизации после обработки их расплавов слабым импульсным магнитным полем. С большой долей вероятности можно прогнозировать проявление подобных магнитокристаллизационных эффектов в других высокомолекулярных полимерах с линейными цепями, обладающими высокой подвижностью и конформационной гибкостью в расплаве и имеющими радикальные концевые группы.

Значительно больший эффект сближения температур $T_{пл}$ и $T_{кр}$ для СКТВ-1 по сравнению с ПЭО подтверждает предположение о том, что радикальные реакции концевых групп являются не единственной причиной изменения кинетики фазовых переходов у кремнийорганического полимера. Еще одним механизмом, ответственным за изменение температур фазовых превращений СКТВ-1, может быть инициированное импульсными магнитными полями сшивание его полимерных цепей через группы со слабыми двойными связями. Поскольку у ПЭО нет слабых двойных связей, индуцированное ИМП сшивание его полимерных цепей может происходить только через реакции радикальных концевых групп, поэтому эффект изменения температур кристаллизации и плавления у этого полимера оказывается существенно меньшим.

Обнаруженная зависимость структуры полимера, кристаллизующегося после предварительной обработки его расплава ИМП, от условий выдержки расплава после воздействия может быть связана с возникновением метастабильных конформационных состояний полимерных цепей в расплаве под действием ИМП и последующей их долговременной релаксацией. Возможной причиной возникновения таких метастабильных конформаций линейных полимерных цепей может быть воздействие ИМП на их полярные боковые группы, имеющие вращательные степени свободы. В СКТВ-1, например, ИМП может воздействовать на вращающиеся метиловые боковые группы CH_3 , обладающие дипольным электрическим и магнитным моментами. При многократном повторении электромагнитных импульсов такое воздействие может изменить положение этих групп относительно линейной полимерной цепи и вызвать изменение ее конформации.

Подобное объяснение индуцированных ИМП эффектов в полимерах на атомном, а не электронно-спиновом уровне было предложено в работе [57], авторы которой наблюдали долговременные изменения пластичности полимеров после воздействия ИМП.

Возникновению метастабильных конформационных состояний способствует также то, что магнитные воздействия способны ослаблять межмолекулярные нехимические связи между соседними участками цепей, что может приводить к разрушению сетки так называемых «физических узлов» и повышению подвижности цепей линейных полимеров [58, 59].

Таким образом, можно предположить, что воздействие ИМП на расплав гибкоцепного линейного полимера вызывает разрушение исходной сетки «физических узлов» полимера, повышение подвижности его линейных цепей и возникновение их метастабильных конформаций, что, в свою очередь, приводит к долговременному изменению морфологии расплава с повышением чувствительности последнего к внешним воздействиям.

Предположение об устранении сетки «физических узлов» позволяет объяснить уменьшение концентрации центров нуклеации при кристаллизации полимера сразу после воздействия ИМП, а повышение подвижности полимерных цепей облегчает их укладку под действием внешнего ориентирующего фактора (например, градиента температуры по толщине образца), приводя к образованию сферолитов большего размера. При длительной выдержке ИМП-обработанного полимера в расплавленном состоянии формируется новая сетка «физических узлов» и происходит снижение подвижности полимерных цепей, что проявляется в наблюдавшемся повышении числа центров зародышеобразования и формировании сплошного кристаллического поля мелких сферолитов.

Переход ИМП-обработанного расплава полимера в метастабильное конформационное состояние с повышенной подвижностью цепей позволяет объяснить наблюдавшееся перераспределение интенсивностей экстремумов токов ТСП и ТСД.

Магнитокристаллизационный эффект в полиэтиленгликолях

Эффект воздействия ИМП на полиэтиленоксиды с молекулярными массами меньше $40 \cdot 10^3$ кг/кмоль (их обычно называют полиэтиленгликолями) проявляется заметно слабее, чем для более «тяжелых» полимеров этой группы. Для примера приведем результаты исследования образцов с молярными массами $20 \cdot 10^3$ кг/кмоль (ПЭГ-20) и $2 \cdot 10^3$ кг/кмоль (ПЭГ-2) [60, 61].

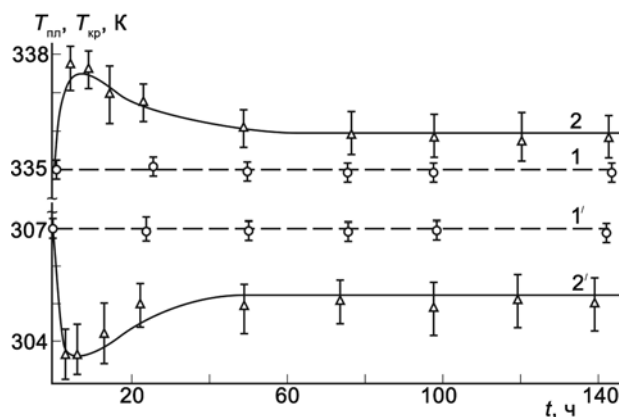


Рис. 11. Зависимость температур плавления (кривая 2) и кристаллизации (2') от времени выдержки после ИМП-воздействия для образцов ПЭГ-20 (режим обработки: $N = 1500$; $B_0 = 0,2$ Тл; $T = 350$ К). Кривые 1 и 1' – для необработанного образца [60]

Fig. 11. The dependence of melting (curve 2) and crystallization (2') of exposure time for the polyethylene glycol sample (PEG-20) after PMF-action (mode processing: $N = 1500$; $B_0 = 0.2$ T; $T = 350$ K). Curves 1 and 1' – untreated sample [60]

На рис. 11 и 12 приведена динамика изменения температур фазовых переходов типа кристалл-расплав-кристалл для образцов ПЭГ-20 и ПЭГ-2 по-

сле ИМП-воздействия. Как видим, в первые часы после воздействия для всех образцов отмечено некоторое расхождение $T_{кр}$ и $T_{пл}$ (то есть увеличение разности ΔT), которое с течением времени после повторных расплавлений сменяется сужением этого интервала. Интересно отметить, что для ПЭО-100 и ПЭО-40 зазор ΔT между $T_{кр}$ и $T_{пл}$ в конце концов становится меньше, чем у необработанных образцов (см. рис. 9), в то время как у ПЭГ-20 и ПЭГ-2 ИМП-обработка вызывает необратимое увеличение ΔT , несмотря на многочисленные повторные процессы расплавления и кристаллизации.

Полученные результаты можно интерпретировать следующим образом. ИМП-воздействие действительно приводит к возникновению в полимере двух конкурирующих процессов. С одной стороны – это разрушение сетки «физических узлов», приводящее к увеличению подвижности полимерных цепей (первоначальное увеличение зазора ΔT), а с другой – образование сшивок между радикальными концевыми группами молекул, которое сопровождается сужением ΔT . Уменьшение молярной массы полимера приводит к снижению «удельного веса» процесса образования сшивок – чем меньше длина молекулярной цепи, тем менее вероятным оказывается влияние ее удлинения в результате возникновения сшивки на изменение механизма кристаллизации (от складывающихся к вытянутым цепям) полимера. Именно поэтому у образцов ПЭО-40 отмечено лишь небольшое уменьшение со временем ΔT (~3 K), а у ПЭГ-20 и особенно у ПЭГ-2 такое уменьшение отсутствует вовсе.

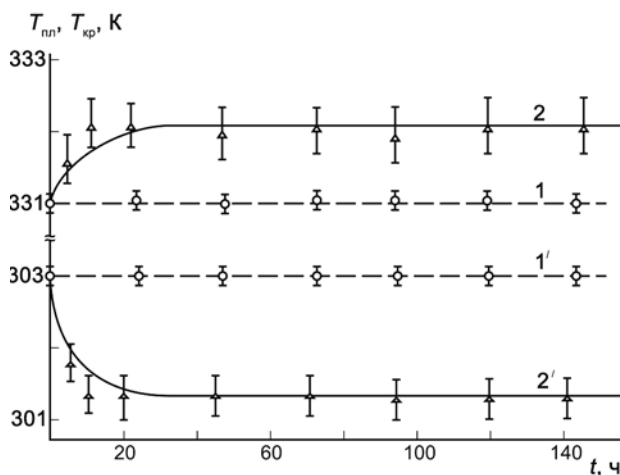


Рис. 12. Зависимость температур плавления (кривая 2) и кристаллизации (2') от времени выдержки после ИМП-воздействия для образцов ПЭГ-2 (режим обработки: $N = 1500$; $B_0 = 0,2$ Тл; $T = 350$ K). Кривые 1 и 1' – для необработанного образца [61]

Fig. 12. The dependence of melting (curve 2) and crystallization (2') of exposure time for the polyethylene glycol sample (PEG-2) after PMF-action (mode processing: $N = 1500$; $B_0 = 0.2$ T; $T = 350$ K). Curves 1 and 1' – untreated sample [61]

Приведенные результаты подтверждают справедливость высказанных ранее модельных представлений о воздействии ИМП на полиэтиленоксиды.

Селективное воздействие слабого постоянного магнитного поля на фазовые переходы в полиэтиленоксиде

Нами было обнаружено, что положения температур фазовых переходов типа кристалл-распла-кристалл в полиэтиленоксиде можно изменить воздействием не только импульсного, но также и слабого постоянного магнитного поля (ПМП) [62-64]. При этом динамика изменения $T_{кр}$ и $T_{пл}$ полимера после воздействия ИМП и ПМП оказывается неодинаковой. Прежде всего следует отметить, что ИМП индуцированный эффект в ПЭО-100 характеризуется наличием порога по величине облучающего поля при $B \sim 0,1$ Тл и выходом на насыщение при $B \geq 0,2$ Тл. В случае воздействия ПМП эффект проявляется в ограниченном интервале индукции магнитного поля, или, другими словами, характеризуется селективностью к индукции магнитного поля. Для полимера ПЭО-100 ПМП-индуцированный эффект отмечен в интервале индукции магнитного поля B от 0,1 до 0,3 Тл с максимумом вблизи значения $B = 0,2$ Тл.

На рис. 13 представлены зависимости изменения ширины температурного интервала $\Delta T = (T_{пл} - T_{кр}) - (T_{пл0} - T_{кр0})$ от величины индукции магнитного поля B , где $T_{кр0}$, $T_{пл0}$ и $T_{кр}$, $T_{пл}$ – значения температур кристаллизации и плавления полимера до и после магнитной обработки его расплава. В случае ИМП B – амплитудное значение магнитной индукции в импульсе.

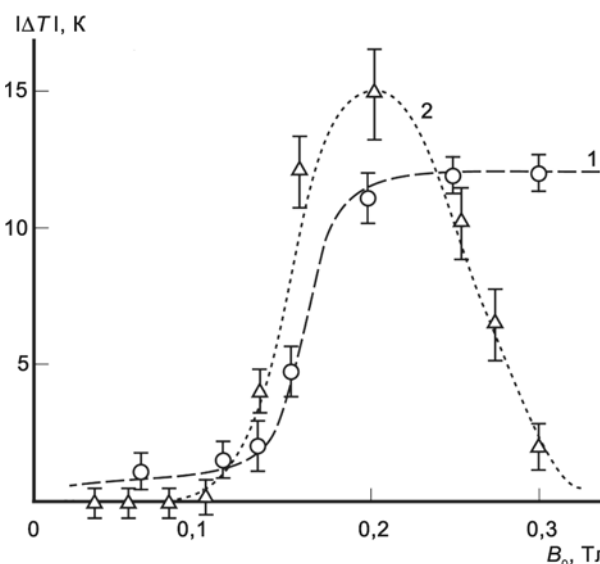


Рис. 13. Зависимости изменения ΔT ПЭО-100 от индукции магнитного поля при обработке его расплава ИМП (кривая 1) и ПМП (кривая 2) [63]

Fig. 13. The ΔT dependence on the magnetic field of the PEO-100 in the processing of its melt (PMF – curve 1, CMF – curve 2) [63]

Зависимости эффектов ИМП- и ПМП-воздействия на величину ΔT от длительности обработки расплава полимера подобны друг другу и имеют три характерных участка – латентный, на котором эффект еще не проявляется, участок резкого усиления эффекта и участок выхода эффекта на насыщение по длительности обработки (рис. 14).

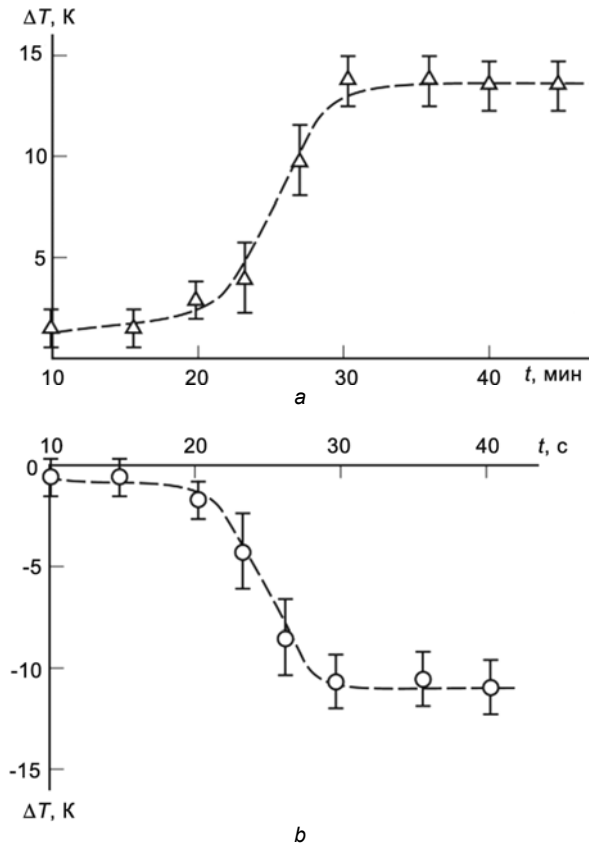


Рис. 14. Зависимости изменения интервала ΔT ПЭО-100 от времени обработки его расплава ПМП (а) и ИМП (б)
Fig. 14. The ΔT dependence on the treatment time of the PEO-100 of its melt (CMF – а, PMF – б)

Как показали оптические эксперименты, у образцов, характеризующихся максимальными сдвигами ΔT , практически сразу после ПМП-обработки наблюдается увеличение размеров кристаллитов, причем по их границам образуется своеобразная сверхструктура (похожая на «дендритную сетку»), ранее не наблюдавшаяся ни у одного из исходных образцов. Более того, процесс плавления таких образцов начинается с плавления именно этой «сетки». Отметим также, что обработанный полимер кристаллизовался после неоднократного перевода его в расплавленное состояние, сохраняя по границам кристаллитов образовавшуюся после ПМП-обработки «сетку». Напомним, что после ИМП-обработки образцов ПЭО-100 при кристаллизации формировалось сплошное поле мелких кристаллитов, имеющих достаточно четкие границы.

Причину появления «сетки» на границах между кристаллитами ПМП-обработанных образцов ПЭО-100 удалось установить, увеличив разрешение получаемых фотоснимков структуры кристаллизующихся образцов. На рис. 15 приведены две фотографии, на которых зафиксирован процесс начала кристаллизации образца ПЭО-100 до (а) и после (б) ПМП-воздействия. У исходного образца образующиеся сферолиты имеют четкие границы, в то время как у ПМП-обработанного – наблюдается их «раздвоение». Это означает, что кристаллиты обработанного полимера «выдавливают» из себя низкомолекулярную фракцию. Такие процессы фракционирования были зафиксированы и раньше в высокомолекулярных гибкоцепных полимерах (правда, они не были связаны с магнитными воздействиями) [52]. Именно эта низкомолекулярная фракция и образует в закристаллизованном образце так называемую «сетку».

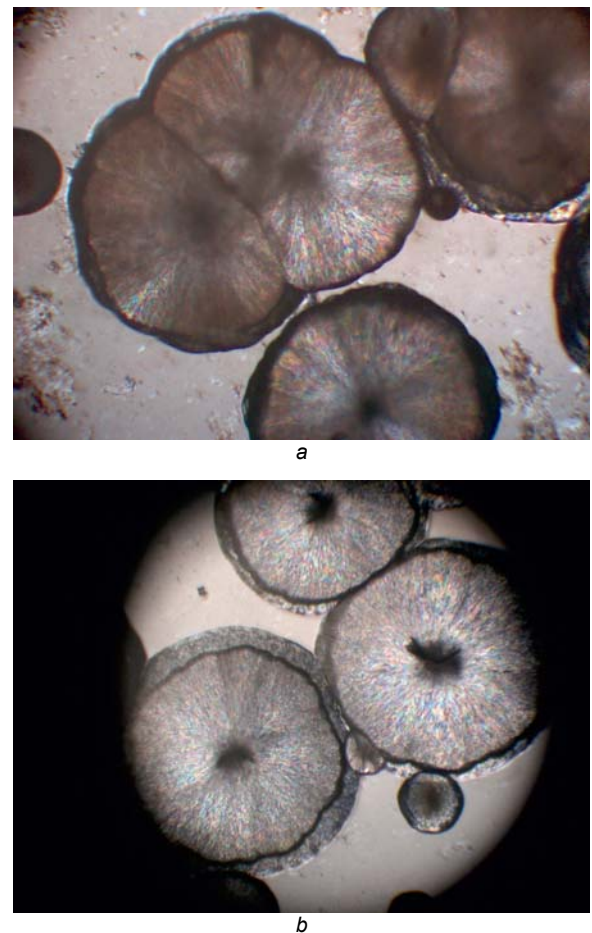
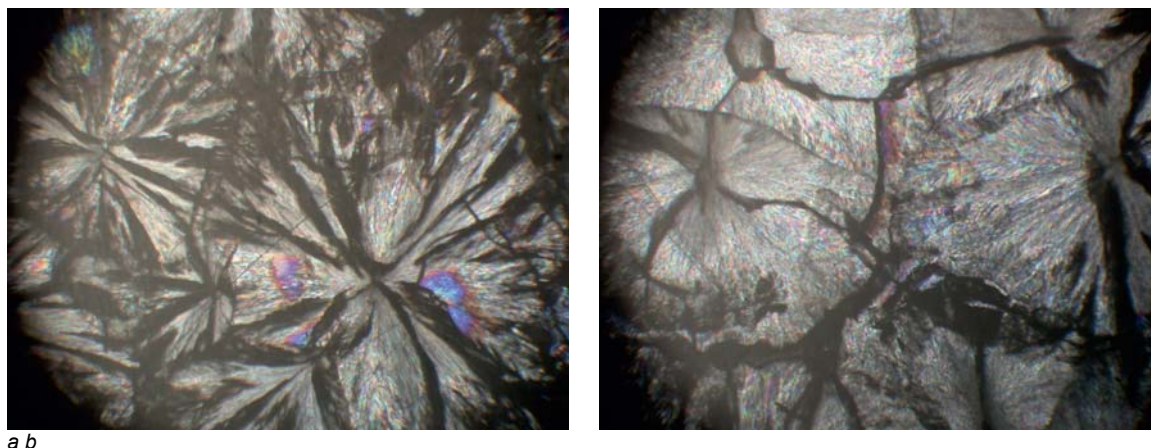


Рис. 15. Кристаллизация образца ПЭО-100 до (а) и после (б) воздействия ПМП (режим обработки $B_0 = 0,2$ Тл; $t = 30$ мин; $T = 350$ К). Увеличение: $\times 40$ [64]
Fig. 15. Crystallization of the PEO-100 before (а) and after (б) exposure CMF (processing mode: $B_0 = 0.2$ T; $t = 30$ min; $T = 350$ K). Magnification: $\times 40$ [64]

Кроме образования «сетки», ПМП-воздействие приводит, как было замечено, к изменению морфологии кристаллического состояния ПЭО-100.



a b

Рис. 16. Конечная стадия кристаллизации образца ПЭО-100: *a* – исходного; *b* – обработанного ПМП (режим обработки $B_0 = 0,2$ Тл; $t = 30$ мин; $T = 350$ К). Увеличение: $\times 40$ [64]

Fig. 16. The final stage of crystallization of the PEO-100: *a* – the original; *b* – treated by PMF (mode processing: $B_0 = 0.2$ T; $t = 30$ min; $T = 350$ K). Magnification: $\times 40$ [64]

На рис. 16 показаны фотографии, дающие представление об этом изменении. Если у исходного образца (*a*) кристаллиты представляют собой сферолиты со складывающимися цепями (кристаллизация по механизму КСЦ), то у ПМП-обработанного (*b*) ясно просматриваются ламели, кристаллизующиеся, как известно, по механизму «вытянутых цепей» (КВЦ) [52].

Поскольку, как уже говорилось выше, ИМП-индуцированные эффекты повышения $T_{кр}$ и понижения $T_{пл}$ ПЭО-100 обусловлены сшиванием полимерных цепей, можно предположить, что обратные эффекты, а именно, понижение $T_{кр}$ и повышение $T_{пл}$ после воздействия ПМП, обусловлены ослаблением взаимодействия между полимерными цепями. Сделанное предположение согласуется с представлениями о разрушении в ПМП так называемых «физических узлов», под которыми понимают локальные участки сильных нехимических взаимодействий между группами атомов соседних молекул и наиболее плотно упакованные участки молекулярных цепей [58]. Кроме того, ослабление взаимодействия между

цепями, и, следовательно, увеличение их подвижности, позволяет объяснить изменение механизма кристаллизации ПЭО-100 после ПМП-воздействия (образование ламелей с вытянутыми цепями).

Механизм воздействия постоянного магнитного поля на межмолекулярные связи полимерных цепей неизвестен, однако селективный характер обнаруженного эффекта по отношению к индукции магнитного поля не позволяет свести этот механизм к обычной ориентации звеньев полимерных цепей, обладающих анизотропией диамагнитной восприимчивости.

Заключение

Подводя итог вышесказанному, можно с уверенностью утверждать, что слабые импульсные и постоянные магнитные поля могут эффективно воздействовать на морфологию и физические свойства целого ряда линейных гибкоцепных кристаллизующихся полимеров, имеющих в молекулярных цепях слабые двойные связи и/или радикальные концевые группы.

Список литературы

1. Вонсовский С.В. Магнетизм. М.: Наука, 1971.
2. Johnson R.C., Merrifield R.E., Avakian P., Flippen R.B. Effect of Magnetic Fields on the Mutual Annihilation of Triplet Excitons in Molecular Crystals // Physical Review Letters. 1967. Vol. 19, No. 6. P. 285-287.
3. Merrifield R.E. Theory of Magnetic Field Effects on the Mutual Annihilation of Triplet Excitons // Journal of Chemical Physics. 1968. Vol. 48, No. 9. P. 4318-4319.
4. Johnson R.C., Merrifield R.E. Effect of Magnetic Fields on the Mutual Annihilation of Triplet Excitons in Anthracene Crystals // Physical Review (B). 1969. Vol. 1. P. 896-902.

References

1. Vonsovskij S.V. Magnetizm. M.: Nauka, 1971.
2. Johnson R.C., Merrifield R.E., Avakian P., Flippen R.B. Effect of Magnetic Fields on the Mutual Annihilation of Triplet Excitons in Molecular Crystals // Physical Review Letters. 1967. Vol. 19, No. 6. P. 285-287.
3. Merrifield R.E. Theory of Magnetic Field Effects on the Mutual Annihilation of Triplet Excitons // Journal of Chemical Physics. 1968. Vol. 48, No. 9. P. 4318-4319.
4. Johnson R.C., Merrifield R.E. Effect of Magnetic Fields on the Mutual Annihilation of Triplet Excitons in Anthracene Crystals // Physical Review (B). 1969. Vol. 1. P. 896-902.

5. Франкевич Е.Л., Балабанов Е.И. Новый эффект увеличения фотопроводимости органических полупроводников в слабом магнитном поле // Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 1, Вып. 6. С. 33-37.

6. Франкевич Е.Л., Балабанов Е.И. Изменение фотопроводимости монокристалла антрацена в магнитном поле // Физика твердого тела. 1966. Т. 8, Вып. 3. С. 855-857.

7. Lesin V.I., Sakun V.P., Pristupa A.I., Frankevich E.L. Reaction Yield Detected Magnetic Resonance Spectra of Intermediate Pairs of Triplet Excitons // Physica Status Solidi (B). 1977. Vol. 84, No. 2. P. 513-520.

8. Frankevich E.L., Tribel M.M., Sokolik I.A. Photoconductivity of Sublimated Rubrene Films during Oxidation // Physica Status Solidi (B). 1976. Vol. 77, No. 1. P. 265-276.

9. Frankevich E.L., Tribel M.M., Sokolik I.A., Kotov B.V. Photoconductivity of the Charge Transfer Complex Crystals. Anthracene-Dimethylpyromellitimide // Physica Status Solidi (A). 1977. Vol. 40, No. 2. P. 665-662.

10. Соколик И.А., Франкевич Е.Л. Влияние магнитных полей на фотопроцессы в органических твердых телах // Успехи физических наук. 1973. Т. 111, Вып. 2. С. 261-288.

11. Франкевич Е.Л., Приступа А.И., Лесин В.И. Двукратные резонансные СВЧ-переходы в промежуточных комплексах реакции аннигиляции триплетных экситонов // Письма в ЖЭТФ. 1977. Т. 26, Вып. 11. С. 725-729.

12. Франкевич Е.Л. О возможном механизме влияния магнитного поля на свойства диамагнитных твердых тел, кристаллизующихся из расплава // Теоретическая и экспериментальная химия. 1977. Т. 13, № 5. С. 690-693.

13. Франкевич Е.Л., Соколик И.А., Кадырев Д.И., Кобрятский В.М. Влияние слабого магнитного поля на электропроводность пленок полиацетилена // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 36, Вып. 11. С. 401-403.

14. Франкевич Е.Л., Приступа А.И., Кобрятский В.М. Новый эффект магнито-резонансного изменения сопротивления органических полупроводников: слабо легированный полиацетилен // Письма в ЖЭТФ. 1984. Т. 40, Вып. 1. С. 13-15.

15. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перекалина Т.М., Урусовская А.А. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля // Физика твердого тела. 1987. Т. 29, Вып. 2. С. 467-470.

16. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Магнитная память дислокаций в монокристаллах NaCl // Письма в ЖЭТФ. 1993. Т. 58, Вып. 3. С. 189-192.

17. Головин Ю.А., Казакова О.Л., Моргунов Р.Б. Подвижность дислокаций в монокристаллах NaCl в постоянном магнитном поле // Физика твердого тела. 1993. Т. 35, Вып. 5. С. 1384-1386.

18. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Магнитная память монокристаллов NaCl с дислокациями // Физика твердого тела. 1993. Т. 35, Вып. 9. С. 2582-2585.

5. Frankevič E.L., Balabanov E.I. Novyj èffekt uveličeniâ fotoprovodimosti organičeskikh poluprovodnikov v slabom magnitnom pole // Pis'ma v ŽETF. 1965. T. 1, Vyp. 6. S. 33-37.

6. Frankevič E.L., Balabanov E.I. Izmenenie fotoprovodimosti monokristalla antracena v magnitnom pole // Fizika tverdogo tela. 1966. T. 8, Vyp. 3. S. 855-857.

7. Lesin V.I., Sakun V.P., Pristupa A.I., Frankevich E.L. Reaction Yield Detected Magnetic Resonance Spectra of Intermediate Pairs of Triplet Excitons // Physica Status Solidi (B). 1977. Vol. 84, No. 2. P. 513-520.

8. Frankevich E.L., Tribel M.M., Sokolik I.A. Photoconductivity of Sublimated Rubrene Films during Oxidation // Physica Status Solidi (B). 1976. Vol. 77, No. 1. P. 265-276.

9. Frankevich E.L., Tribel M.M., Sokolik I.A., Kotov B.V. Photoconductivity of the Charge Transfer Complex Crystals. Anthracene-Dimethylpyromellitimide // Physica Status Solidi (A). 1977. Vol. 40, No. 2. P. 665-662.

10. Sokolik I.A., Frankevič E.L. Vliânie magnitnyh polej na fotoprocessy v organičeskikh tverdyh telah // Uspehi fizičeskikh nauk. 1973. T. 111, Vyp. 2. S. 261-288.

11. Frankevič E.L., Pristupa A.I., Lesin V.I. Dvukratnye rezonansnye SVČ-perehody v promežutočnyh kompleksah reakcii annigilâcii tripletnykh èksitonov // Pis'ma v ŽETF. 1977. T. 26, Vyp. 11. S. 725-729.

12. Frankevič E.L. O vozmožnom mehanizme vliâniâ magnitnogo polâ na svojstva diamagnitnyh tverdyh tel, kristallizujuših'sâ iz rasplava // Teoretičeskaâ i èksperimental'naâ himiâ. 1977. T. 13, № 5. S. 690-693.

13. Frankevič E.L., Sokolik I.A., Kadyrev D.I., Kobrânskij V.M. Vliânie slabogo magnitnogo polâ na èlektroprovodnost' plenok poliacetilena // Pis'ma v ŽETF. 1982. T. 36, Vyp. 11. S. 401-403.

14. Frankevič E.L., Pristupa A.I., Kobrânskij V.M. Novyj èffekt magnito-rezonansnogo izmeneniâ soprotivleniâ organičeskikh poluprovodnikov: slabo legirovannyj poliacetilen // Pis'ma v ŽETF. 1984. T. 40, Vyp. 1. S. 13-15.

15. Al'sic V.I., Darinskaâ E.V., Perekalina T.M., Urusovskaâ A.A. O dviženii dislokacij v kristallah NaCl pod dejstviem postoânnoho magnitnogo polâ // Fizika tverdogo tela. 1987. T. 29, Vyp. 2. S. 467-470.

16. Golovin Ū.I., Morgunov R.B. Magnitnaâ pamât' dislokacij v monokristallah NaCl // Pis'ma v ŽETF. 1993. T. 58, Vyp. 3. S. 189-192.

17. Golovin Ū.A., Kazakova O.L., Morgunov R.B. Podvižnost' dislokacij v monokristallah NaCl v postoânnom magnitnom pole // Fizika tverdogo tela. 1993. T. 35, Vyp. 5. S. 1384-1386.

18. Golovin Ū.I., Morgunov R.B. Magnitnaâ pamât' monokristallov NaCl s dislokaciâmi // Fizika tverdogo tela. 1993. T. 35, Vyp. 9. S. 2582-2585.



19. Galligan J.M., Pang C.S. The electron drag on mobile dislocations in cooper and aluminum at low temperatures. Strain rate, temperature and field dependence // *Journal of Applied Physics*. 1979. Vol. 50, No. 10. P. 6253-6256.
20. Motowidlo L., Goldman P., Yalamanchi B., Galligan J.M. Influence of dislocation drag on twinning in zinc // *Physical Review Letters*. 1980. Vol. 44, No. 14. P. 934-936.
21. Galligan J.M. Dislocation drag mechanisms in normal state metals // *Scripta Metallurgica*. 1984. Vol. 18, No. 7. P. 653-656.
22. Jemielniak R., Krolikowski J. Study of dislocations in a magnetic field by ultrasonic methods // *Journal of Technical Physics*. 1986. Vol. 27, No. 1-2. P. 173-185.
23. Дацко О.И., Алексеенко В.И., Брусова А.Л. Влияние импульсов слабого магнитного поля на зернограницную релаксацию в алюминии // *Физика твердого тела*. 1999. Т. 14, Вып. 11. С. 1985-1987.
24. Пинчук А.И., Шаврей С.Д. Магнитопластический эффект в случае двойникования кристаллов висмута под действием сосредоточенной нагрузки // *Физика твердого тела*. 2001. Т. 43, Вып. 1. С. 39-41.
25. Алексеенко В.И. Реакция системы дислокация – примесь на электромагнитное воздействие // *Журнал технической физики*. 2000. Т. 70, № 6. С. 63-66.
26. Осипьян Ю.А., Моргунов Р.Б., Баскаков А.А. и др. Магнитрезонансное упрочнение монокристаллов кремния // *Письма в ЖЭТФ*. 2004. Т. 79, Вып. 3. С. 158-162.
27. Осипьян Ю.А., Головин Ю.И., Лопатин Д.В. и др. Влияние импульсного магнитного поля на микротвердость монокристаллов C_{60} // *Письма в ЖЭТФ*. 1999. Т. 69, Вып. 2. С. 110-113.
28. Головин Ю.И. Магнитопластичность твердых тел // *ФТТ*. 2004. Т. 46, Вып. 5. С. 769-803.
29. Жорин В.А., Мухина Л.Л., Разумовская И.В. Влияние магнитной обработки на микротвердость полиэтилена и полипропилена // *Высокомолекулярные соединения*. 1998. Т. 40Б, № 7. С. 1213-1215.
30. Песчанская Н.Н., Якушев П.Н. Ползучесть полимеров в постоянном магнитном поле // *Физика твердого тела*. 1997. Т. 39, № 9. С. 1690-1692.
31. Песчанская Н.Н., Якушев П.Н. Деформация твердых полимеров в постоянном магнитном поле // *Физика твердого тела*. 2003. Т. 45, № 6. С. 1130-1134.
32. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б. Новый тип магнитопластических эффектов в линейных аморфных полимерах // *Физика твердого тела*. 2001. Т. 43, Вып. 5. С. 827-832.
33. Головин Ю.И., Моргунов Р.Б., Ликсутин С.Ю. Термодинамические и кинетические аспекты влияния импульсного магнитного поля на микротвердость полиметилметакрилата // *Высокомолекулярные соединения (серия Б)*. 1999. Т. 42, № 2. С. 277-281.
34. Моргунов Р.Б., Головин Ю.И., Якунин Д.В., Трофимова И.Н. Электромагнитопластический эффект в аморфном полиметилметакрилате // *Высокомолекулярные соединения (серия Б)*. 2002. Т. 44, № 1. С. 129-131.

19. Galligan J.M., Pang C.S. The electron drag on mobile dislocations in cooper and aluminum at low temperatures. Strain rate, temperature and field dependence // *Journal of Applied Physics*. 1979. Vol. 50, No. 10. P. 6253-6256.
20. Motowidlo L., Goldman P., Yalamanchi B., Galligan J.M. Influence of dislocation drag on twinning in zinc // *Physical Review Letters*. 1980. Vol. 44, No. 14. P. 934-936.
21. Galligan J.M. Dislocation drag mechanisms in normal state metals // *Scripta Metallurgica*. 1984. Vol. 18, No. 7. P. 653-656.
22. Jemielniak R., Krolikowski J. Study of dislocations in a magnetic field by ultrasonic methods // *Journal of Technical Physics*. 1986. Vol. 27, No. 1-2. P. 173-185.
23. Dacko O.I., Alekseenko V.I., Brusova A.L. Vlianie impul'sov slabogo magnitnogo polâ na zernogranichnuu relaksaciû v alûminii // *Fizika tverdogo tela*. 1999. T. 14, Vyp. 11. S. 1985-1987.
24. Pinčuk A.I., Šavrej S.D. Magnitoplastičeskij èffekt v slučae dvojnikovaniâ kristallov vismuta pod dejstviem sosredotočennoj nagruzki // *Fizika tverdogo tela*. 2001. T. 43, Vyp. 1. S. 39-41.
25. Alekseenko V.I. Reakciâ sistemy dislokaciâ – primes' na èlektromagnitnoe vozdejstvie // *Žurnal tehničkoj fiziki*. 2000. T. 70, № 6. S. 63-66.
26. Osip'ân Ū.A., Morgunov R.B., Baskakov A.A. i dr. Magnitrezonansnoe upročnenie monokristallov kremniâ // *Pis'ma v ŽETF*. 2004. T. 79, Vyp. 3. S. 158-162.
27. Osip'ân Ū.A., Golovin Ū.I., Lopatin D.V. i dr. Vlianie impul'snogo magnitnogo polâ na mikrotverdost' monokristallov C_{60} // *Pis'ma v ŽETF*. 1999. T. 69, Vyp. 2. S. 110-113.
28. Golovin Ū.I. Magnitoplastičnost' tverdyh tel // *Fizika tverdogo tela*. 2004. T. 46, Vyp. 5. S. 769-803.
29. Žorin V.A., Muhina L.L., Razumovskaâ I.V. Vlianie magnitnoj obrabotki na mikrotverdost' poli-ëtilena i polipropilena // *Vysokomolekulârnye soedineniâ*. 1998. T. 40B, № 7. S. 1213-1215.
30. Peščanskaâ N.N., Âkušev P.N. Polzučest' polimerov v postoânnom magnitnom pole // *Fizika tverdogo tela*. 1997. T. 39, № 9. S. 1690-1692.
31. Peščanskaâ N.N., Âkušev P.N. Deformaciâ tverdyh polimerov v postoânnom magnitnom pole // *Fizika tverdogo tela*. 2003. T. 45, № 6. S. 1130-1134.
32. Golovin Ū.I., Morgunov R.B. Novyj tip magnitoplastičeskikh èffektov v linejnyh amorfnyh polimerah // *FTT*. 2001. T. 43, Vyp. 5. S. 827-832.
33. Golovin Ū.I., Morgunov R.B., Liksutin S.Ū. Termodinamičeskie i kinetičeskie aspekty vliâniâ impul'snogo magnitnogo polâ na mikrotverdost' polimetilmetakrilata // *Vysokomolekulârnye soedineniâ (seriâ B)*. 1999. T. 42, № 2. S. 277-281.
34. Morgunov R.B., Golovin Ū.I., Âkunin D.V., Trofimova I.N. Èlektromagnitoplastičeskij èffekt v amorfnom polimetilmetakrilate // *Vysokomolekulârnye soedineniâ (seriâ B)*. 2002. T. 44, № 1. S. 129-131.

35. Соболевский М.В., Музовская О.А., Попелева Г.С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. М.: Химия, 1975.
36. Соболевский М.В., Скороходов И.И., Гриневич К.П. и др. Олигоорганосилоксаны. М.: Химия, 1985.
37. Матвеев Н.Н., Постников В.В., Саушкин В.В. Поляризационные эффекты в кристаллизующихся полимерах. Воронеж: ВГЛТА, 2000.
38. Вертопрахов В.М., Сальман Е.Г. Термостимулированные токи в неорганических веществах. Новосибирск: Наука, 1979.
39. Matveev N.N., Postnikov V.V. Identification of crystal-crystal transition in cellulose using pyroelectric currents // *Ferroelectrics*. 1994. Vol. 153. P. 341-346.
40. Постников В.В., Левин М.Н., Матвеев Н.Н. Влияние импульсного магнитного поля на кинетику кристаллизации и плавления органосилоксанов // *Вестник ВГТУ, серия «Материаловедение»*. Выпуск 1.9. Воронеж, 2001. С. 19-23.
41. Решение о выдаче патента РФ №3044370 от 7.09.1993. Способ обработки импульсным магнитным полем и устройство для его реализации / Левин М.Н., Кадменский С.Г., Лукина Е.А., Масловский В.М., Суровцев И.С.
42. Левин М.Н., Постников В.В., Матвеев Н.Н. Влияние импульсной магнитной обработки на кристаллизацию гибкоцепных полимеров // *Высокомолекулярные соединения (серия А)*. 2003. Т. 45, № 2. С. 217-223.
43. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть 1. М.: Наука, 1976.
44. Мирошниченко В.Ф., Семенук Н.И. Термодинамические основы процесса влияния электромагнитных полей на расплав полимеров // *Пластические массы*. 1970. № 10. С. 35-36.
45. Волькенштейн М.В. Проблемы теоретической физики полимеров // *Успехи физических наук*. 1959. Т. 67, Вып. 1. С. 131-161.
46. Уббеллоде А.Р. Плавление и кристаллическая структура. М. Мир, 1969.
47. Зельдович Я.Б., Бучаченко А.Л., Франкевич Е.Л. Магнито-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике // *Успехи физ. наук*. 1988. Т. 155, № 1. С. 3-45.
48. Steiner U.E., Ulrich T. Magnetic field effects in chemical kinetics and related phenomena // *Chemical Review*. 1989. Vol. 89. P. 51-147.
49. McLauchlan K.A., Steiner U.E. The spin-correlated pair as a reaction intermediate // *Molecular Physics*. 1991. Vol. 73, No. 2. P. 241-263.
50. Бучаченко А.Л. Магнитные эффекты в химических реакциях // *Успехи химии*. 1976. Т. 45, № 5. С. 761-792.
51. Никитин Е.Е., Смирнов Б.М. Медленные атомные столкновения. М.: Энергоатомиздат, 1990.
52. Вундерлих Б. Физика макромолекул. Том 3. М.: Мир, 1984.
53. Sobolevskij M.V., Muzovskaâ O.A., Popeleva G.S. Svojstva i oblasti primeneniâ kremnijorganičeskikh produktov. M.: Himiâ, 1975.
54. Sobolevskij M.V., Skorohodov I.I., Grinevič K.P. i dr. Oligoorganosiloksany. M.: Himiâ, 1985.
55. Matveev N.N., Postnikov V.V., Sauškin V.V. Polârizacionnye êffekty v kristallizuûsihsâ polimerah. Voronež: VGLTA, 2000.
56. Vertoprahov V.M., Sal'man E.G. Termostimulirovannye toki v neorganičeskikh vešestvah. Novosibirsk: Nauka, 1979.
57. Matveev N.N., Postnikov V.V. Identification of crystal-crystal transition in cellulose using pyroelectric currents // *Ferroelectrics*. 1994. Vol. 153. P. 341-346.
58. Postnikov V.V., Levin M.N., Matveev N.N. Vliânie impul'snogo magnitnogo polâ na kinetiku kristallizacii i plavleniâ organosiloksanov // *Vestnik VGTU, seriâ «Materialovedenie»*. Vypusk 1.9. Voronež, 2001. S. 19-23.
59. Rešenie o vydače patenta RF №3044370 ot 7.09.1993. Sposob obrabotki impul'snym magnitnym polem i ustrojstvo dlâ ego realizacii / Levin M.N., Kadmenskij S.G., Lukina E.A., Maslovskij V.M., Surovcev I.S.
60. Levin M.N., Postnikov V.V., Matveev N.N. Vliânie impul'snoj magnitnoj obrabotki na kristallizaciû gibkocepnym polimerov // *Vysokomolekulârnye soedineniâ (seriâ A)*. 2003. T. 45, № 2. S. 217-223.
61. Landau L.D., Liščic E.M. Statističeskaâ fizika. Čast' 1. M.: Nauka, 1976.
62. Mirošničenko V.F., Semenûk N.I. Termodinamičeskie osnovy processa vliâniâ êlektromagnitnyh polej na rasplav polimerov // *Plastičeskie massy*. 1970. № 10. S. 35-36.
63. Vol'kenštejn M.V. Problemy teoretičeskoj fiziki polimerov // *Uspehi fizičeskikh nauk*. 1959. T. 67, Vyp. 1. S. 131-161.
64. Ubbelode A.R. Plavlenie i kristalličeskaâ struktura. M. Mir, 1969.
65. Zel'dovič Â.B., Bučačenko A.L., Frankevič E.L. Magnito-spinovye êffekty v himii i molekulârnoj fizike // *Uspehi fiz. nauk*. 1988. T. 155, № 1. S. 3-45.
66. Steiner U.E., Ulrich T. Magnetic field effects in chemical kinetics and related phenomena // *Chemical Review*. 1989. Vol. 89. P. 51-147.
67. McLauchlan K.A., Steiner U.E. The spin-correlated pair as a reaction intermediate // *Molecular Physics*. 1991. Vol. 73, No. 2. P. 241-263.
68. Bučačenko A.L. Magnitnye êffekty v himičeskikh reakciâh // *Uspehi himii*. 1976. T. 45, № 5. S. 761-792.
69. Nikitin E.E., Smirnov B.M. Medlennye atomnye stolknoveniâ. M.: Ênergoatomizdat, 1990.
70. Vunderlih B. Fizika makromolekul. Tom 3. M.: Mir, 1984.
71. Postnikov V.V., Kadancev A.V., Kolesnikova E.D., Levin M.N. Ustanovka dlâ issledovaniâ polârizacionnyh svojstv linejnyh polimerov pri fazovyh perehodah tipa kristall-rasplav // *Izmeritel'naâ tehnikâ*. 2005. № 12. S. 66-67.

53. Постников В.В., Каданцев А.В., Колесникова Е.Д., Левин М.Н. Установка для исследования поляризационных свойств линейных полимеров при фазовых переходах типа кристалл-расплав // Измерительная техника. 2005. № 12. С. 66-67.

54. Постников В.В., Каданцев А.В., Колесникова Е.Д., Левин М.Н. Автоматизированный комплекс для исследования теплофизических свойств кристаллизующихся полимеров // Измерительная техника. 2006. № 2. С. 45-46.

55. Левин М.Н., Постников В.В., Вережников В.Н. и др. Предкристаллизационная обработка гибкоцепных полимеров импульсными магнитными полями // Конденсированные среды и межфазные границы. 2004. Т. 6, № 1. С. 75-80.

56. Постников В.В., Левин М.Н., Матвеев Н.Н., Долгополова Э.А., Колесникова Е.Д. Модификация кристаллизующихся полимеров слабыми магнитными полями // Кибернетика и высокие технологии XXI века. Материалы VI Международной научно-технич. конференции. Воронеж: ВГУ, 2005. С. 562-575.

57. Моргунов Р.Б., Головин Ю.И., Якунин Д.В., Трофимова И.Н. Электромагнитопластический эффект в аморфном полиметилметакрилате // Высокомолекулярные соединения (серия Б). 2002. Т. 44, № 1. С. 129-131.

58. Песчанская Н.Н., Суrowова В.Ю., Якушев П.Н. О влиянии постоянного магнитного поля на кинетику деформации полимеров // Физика твердого тела. 1992. Т. 34, № 7. С. 2111-2117.

59. Песчанская Н.Н., Якушев П.Н., Егоров В.М. и др. Скачкообразная деформация и морфология полимеров // ФТТ. 2002. Т. 44, № 9. С. 1609-1613.

60. Постников В.В., Левин М.Н., Каданцев А.В., Колесникова Е.Д. Воздействие слабых импульсных магнитных полей на процессы кристаллизации и плавления полиэтиленоксида // Тонкие пленки и наноструктуры. Материалы Международной научной конференции. М: МИРЭА, 2005. Часть II. С. 184-186.

61. Постников В.В., Левин М.Н., Колесникова Е.Д. Фазовые переходы в полиэтиленоксидах после воздействия слабых импульсных магнитных полей // Intermatic – 2005. Материалы Межд. научн.-техн. конф. М: МИРЭА, 2006. Часть 1. С. 130-132.

62. Левин М.Н., Постников В.В., Матвеев Н.Н., Каданцев А.В., Колесникова Е.Д. Влияние импульсного и постоянного магнитных полей на фазовые переходы в полиэтиленоксиде // «Молодые ученые – 2002». Материалы Международной научно-технической конференции М: МИРЭА, 2002. С. 56-60.

63. Постников В.В., Левин М.Н., Колесникова Е.Д. Селективное воздействие постоянного магнитного поля на кристаллизацию полиэтиленоксида // Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов. Материалы V Международной конференции Воронеж: ВГТУ, 2003. С. 162-163.

64. Левин М.Н., Постников В.В., Колесникова Е.Д. Селективный эффект предкристаллизационной обработки гибкоцепных полимеров постоянным магнитным полем // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, Вып. 3. С. 20-23.

54. Postnikov V.V., Kadancev A.V., Kolesnikova E.D., Levin M.N. Avtomatizirovannyj kompleks dlâ isledovaniâ teplofiziceskih svojstv kristallizuûšihâ polimerov // Izmeritel'naâ tehnika. 2006. № 2. S. 45-46.

55. Levin M.N., Postnikov V.V., Verežnikov V.N. i dr. Predkristallizacionnâ obrabotka gibkocepnyh polimerov impul'snymi magnitnymi polâmi // Kondensirovannye sredy i mežfaznye granicy. 2004. T. 6, № 1. S. 75-80.

56. Postnikov V.V., Levin M.N., Matveev N.N., Dolgopolova È.A., Kolesnikova E.D. Modifikaciâ kristallizuûšihâ polimerov slabymi magnitnymi polâmi // Kibernetika i vysokie tehnologii XXI veka. Materialy VI Meždunarodnoj naučno-tehnič. konferencii. Voronež: VGU, 2005. S. 562-575.

57. Morgunov R.B., Golovin Û.I., Âkunin D.V., Trofimova I.N. Èlektromagnitoplastičeskij èffekt v amorfnom polimetilmetakrilate // Vysokomolekulârnye soedineniâ (seriâ B). 2002. T. 44, № 1. S. 129-131.

58. Pesčanskaâ N.N., Surovova V.Û., Âkušev P.N. O vliânii postoânnoho magnitnogo polâ na kinetiku deformacii polimerov // Fizika tverdogo tela. 1992. T. 34, № 7. S. 2111-2117.

59. Pesčanskaâ N.N., Âkušev P.N., Egorov V.M. i dr. Skačkoobraznâ deformaciâ i morfologiâ polimerov // Fizika tverdogo tela. 2002. T. 44, № 9. S. 1609-1613.

60. Postnikov V.V., Levin M.N., Kadancev A.V., Kolesnikova E.D. Vozdejstvie slabyh impul'snyh magnitnyh polej na processy kristallizacii i plavleniâ poliètilenoksida // Tonkie plenki i nanostrukтуры. Materialy Meždunarodnoj naučnoj konferencii. M: MIRÈA, 2005. Čast' II. S. 184-186.

61. Postnikov V.V., Levin M.N., Kolesnikova E.D. Fazovye perehody v poliètilenoksidad posle vozdejstviâ slabyh impul'snyh magnitnyh polej // Intermatic – 2005. Materialy Meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii M: MIRÈA, 2006. Čast' I. S. 130-132.

62. Levin M.N., Postnikov V.V., Matveev N.N., Kadancev A.V., Kolesnikova E.D. Vliânne impul'snogo i postoânnoho magnitnyh polej na fazovye perehody v poliètilenokside // «Molodye učenye – 2002». Materialy Meždunarodnoj naučno-tehničeskoj konferencii M: MIRÈA, 2002. S. 56-60.

63. Postnikov V.V., Levin M.N., Kolesnikova E.D. Selektivnoe vozdejstvie postoânnoho magnitnogo polâ na kristallizaciû poliètilenoksida // Dejstvie èlektromagnitnyh polej na plastičnost' i pročnosť materialov. Materialy V Meždunarodnoj konferencii Voronež: VGTU, 2003. S. 162-163.

64. Levin M.N., Postnikov V.V., Kolesnikova E.D. Selektivnyj èffekt predkristallizacionnoj obrabotki gibkocepnyh polimerov postoânnyim magnitnym polem // Pis'ma v ŽTF. 2004. T. 30, Vyp. 3. S. 20-23.

Транслитерация по ISO 9:1995

