

**Г. А. Вершина, Л. Е. Реут**

*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь*

## **АНАЛИЗ ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ФТОРОПЛАСТА-4 В УСЛОВИЯХ СИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Работа посвящена анализу деформационного поведения фторопласта в условиях нагружения и изучению возможности изготовления фторопластовых изделий методом холодного формоизменения прессованных заготовок без последующих операций нагрева и термофиксации размеров готовой детали. На основании многочисленных исследований, проводимых по изучению полимера в различных лабораториях, авторами предпринята попытка создания механической модели фторопласта и обоснования возможности применения к расчету фторопластовых изделий теоретических методов и подходов, разработанных для низкомолекулярных материалов. Рассматривается технологический процесс изготовления разрезных фторопластовых колец, получаемых путем навивки ленточной заготовки на цилиндрическую оправку, и изучается возможность создания теоретической базы для разработки и расчета инструмента, позволяющего при холодном деформировании получать изделия требуемых размеров и форм. На основании обобщения и анализа результатов исследований относительно строения фторопласта, изменения его структуры при силовом воздействии и характера возникающих деформаций авторами впервые обоснована и доказана возможность принятия для полимера модели твердого кристаллического тела и применения к математическому описанию его деформационного поведения при нагружении подходов и расчетных методик, разработанных в механике твердых деформируемых сред для классических низкомолекулярных материалов.

*Ключевые слова:* фторопласт, структура, деформации при силовом воздействии, рекристаллизация, деформационное поведение, механическая модель материала, механика твердых деформируемых тел, холодное формование изделий.

**G. A. Vershina, L. E. Reut**

*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

## **ANALYSIS OF DEFORMATION BEHAVIOUR OF FLUOROPLASTIC-4 IN THE CONDITIONS OF MECHANICAL AFFECT**

Analysis of deformation behaviour of fluoroplastic-4 in the conditions of mechanical affect. Polymeric materials and, in particular, fluoroplastic-4 and modifications on its basis are widely used in industry. Unique properties of a fluoroplastic make it irreplaceable constructional material and provide a high demand for production of details of different function. The work is devoted to the analysis of deformation behavior of fluoroplastic in the conditions of loading and to studying of possibility of manufacturing of fluoroplastic products by a method of cold forming of the pressed preparations without the subsequent operations of heating and thermofixing of the sizes of a ready detail. On the basis of the numerous researches of the polymer in various laboratories, authors undertake attempt of creation of mechanical model of fluoroplastic and substantiation of possibility of application of theoretical methods and the approaches, developed for low-molecular materials, to calculation of fluoroplastic products. A technological process of manufacturing of cutting fluoroplastic rings obtained by winding a tape preparation on cylindrical pilot is considered, and possibility of creation a theoretical base for design and calculation of a tool allowing cold deformation to obtain a product of demanded shape and size is studied. By results of the analysis it is established, that owing to high crystallinity of fluoroplastic, obtained at polymerization and increasing at recrystallization processes, its structure can be considered as completely crystal, homogeneous and isotropic, corresponding to materials studied in the mechanic of solid deformable bodies. Neglecting to the presence in structure of an insignificant amorphous phase and its influence on the deformation mechanism, mechanical behaviour of fluoroplastic at power influence it is possible to consider as the process including only two deformations – *elastic* (consisting truly elastic and highly-elastic, submitting to certain values to Hooke's law) and *residual*, growing out of structural reorganization of a material. At the same time, exactly recrystallization, leading to occurrence of irreversible deformations, it is necessary to accept as a limit state of a material, and as settlement limit pressure it is necessary to use a limit of recrystallization of a material. On the basis of generalization and analysis of results of researches concerning a structure of fluoroplastic, changes of its structure at power influence and character of arising deformations, authors founded and proved for the first time a possibility of acceptance of the model of solid crystal body for the polymer and application of approaches and settlement techniques developed in the mechanic of solid deformable environments for classical low-molecular materials to the mathematical description of its deformation behavior at loading.

*Keywords:* fluoroplastic, structure, deformations at power influence, recrystallization, deformation behavior, mechanical model of material, mechanics of solid deformable bodies, cold formation of products.

**Введение.** Фторопласт-4 (политетрафторэтилен), известный первоначально под названием «тефлон», открыт в 1938 г. и получил широкое применение в самых различных отраслях промышленности и областях народного хозяйства. Обладая целым рядом уникальных свойств (химическая инертность к любым агрессивным средам, проявляемая до  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , самый низкий среди всех полимеров коэффициент трения, высокая термостойкость и отличные диэлектрические и механические свойства, сохраняемые в диапазоне температур от  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$  [1, 2], а также физиологическая и биологическая безвредность), фторопласт-4 является ценным и незаменимым конструкционным материалом в химической и электротехнической промышленности, в приборостроении, машиностроении, авиации, военной и космической технике, в нефтегазовой отрасли и атомной энергетике, а также в медицине, легкой и пищевой промышленности.

Номенклатура деталей, изготавливаемых из фторопласта-4, весьма разнообразна. В технических конструкциях широко используются его антифрикционные свойства как самого «скользкого» из полимеров, поэтому его применяют в качестве матричной основы или покрытия при производстве подшипников и деталей, подвергающихся интенсивному трению и истиранию (поршневые кольца, манжеты, сальники и т. д.). Из фторопласта-4 изготавливают мембраны, фильтры, трубы, втулки, уплотнительные кольца для фланцевых и резьбовых соединений, элементы запорных и регулирующих клапанов, а также другие детали требуемого назначения. Для изготовления деталей применяют фторопластовые заготовки различной конфигурации (цилиндры, листы, стержни, волокна и др.), которые подвергают соответствующей механической обработке для придания деталям необходимых размеров и форм. Учитывая, что фторопласт-4 ни при каких температурных условиях, даже выше температуры разложения ( $+415\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), не переходит в вязкотекучее состояние, достаточное для горячего прессования или литья под давлением, основными технологическими процессами изготовления фторопластовых изделий являются холодное прессование порошкообразного полимера с последующим спеканием, а затем дальнейшее формоизменение полученной заготовки обработкой резанием (для получения пленок, листов, волокон) или давлением путем создания в заготовке остаточных необратимых деформаций, придающих детали необходимую форму. При этом большинство существующих в настоящее время технологий связано со значительными отходами материала и необходимостью термообработки изделий, что делает процесс их изготовления малопродуктивным и дорогостоящим.

Данная работа посвящена исследованию технологического процесса изготовления разрезных фторопластовых колец (рис. 1), получаемых из ленточной заготовки прямоугольного сечения путем наматывания ленты на цилиндрическую оправку с последующими нагреванием, термофиксацией и разрезкой [3, 4]. Такая технология позволяет значительно снизить отходы производства, а также существенно повысить производительность за счет автоматизации полного цикла изготовления разрезного кольца, однако необходимость обязательной термообработки детали для фиксации ее размеров и формы приводит к дополнительным энергозатратам, требует увеличения времени изготовления и, как следствие, повышает стоимость изделий.

Цель настоящей статьи – анализ механического поведения фторопласта-4 в условиях нагружения и исследование возможности изготовления колец требуемого диаметра методом *холодной навивки* ленточной заготовки на калибр, а затем разрезания полученной спирали на кольца без последующей термофиксации изделий.

**Механическая модель фторопласта-4. Анализ и обоснование выбора.** Деформационное поведение полимеров под нагрузкой обладает целым рядом особенностей и специфических проявлений, зависящих от природы материала, его молекулярного строения и структуры, температуры и скорости нагружения и т. д. Это создает большие трудности при попытках теоретического описания процесса и в силу разнообразности свойств полимеров не позволяет создать единую стройную теорию, охватывающую хотя бы один класс полимерных материалов.

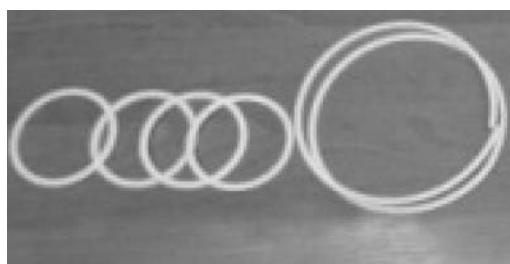


Рис. 1. Уплотнительные фторопластовые кольца

В настоящее время основными данными относительно поведения полимеров под нагрузкой являются ре-

зультаты экспериментальных исследований, а основными расчетными формулами – эмпирические формулы, построенные на этих результатах.

Исследования показывают, что полимеры в зависимости от их структуры и температурного состояния проявляют под нагрузкой самые разнообразные свойства, подобные, например, упругим свойствам газов либо высоковязким жидкостям, либо деформируются так же, как это происходит в твердых деформируемых телах. Возникающие аналогии поведения позволяют для некоторых условий нагружения применять к исследованию процесса деформирования фторопласта-4 теории и расчетные формулы, достаточно полно разработанные для соответствующих материалов, но с адаптацией к специфике полимера.

Для создания механической модели фторопласта-4, определяющей его поведение под нагрузкой, и исследования возможности применения к нему теоретических подходов, разработанных для классических материалов, рассмотрим структуру полимера и произведем схематизацию свойств, позволяющую приблизить его деформационное поведение к указанным материалам.

Полимерные материалы представляют собой высокомолекулярные соединения, состоящие из длинных молекулярных цепей (макромолекул), образованных многократно повторяющимися мономерными звеньями, одинаковыми или разными по химическому составу и строению. Большая длина молекулярных цепей и возможность свободного вращения звеньев вокруг валентных связей обуславливают стремление макромолекул к сворачиванию, поэтому они принимают разнообразные конформации в виде клубков, повторяющихся изгибов, складок, спиралей и т. д., являющиеся термодинамически наиболее устойчивыми. Макромолекулы, имея значительную длину при очень малом поперечном размере, обладают высокой гибкостью, но, соединяясь между собой химическими или координационными связями, они образуют различные конфигурации и структуры, определяющие своеобразие свойств и специфику поведения полимерных материалов. Поэтому в формировании свойств полимеров значение имеет не только *химическая структура*, определяемая видом атомов и способом их соединения в молекулярные цепи, но и *надмолекулярная (физическая) структура*, т. е. способ упаковки макромолекул, размеры и форма полученных конструкций и их взаимное пространственное расположение. Надмолекулярная структура является характерной особенностью полимерных материалов и во многом определяет их технологические и эксплуатационные свойства [5].

Собираясь в конструкции различным образом, макромолекулы могут располагаться хаотически или укладываться упорядоченно, создавая соответственно аморфные (с ближним порядком) или кристаллические (с дальним порядком) структуры. Каждая из них обладает своими свойствами и своим механическим проявлением при температурно-силовых воздействиях.

*Аморфные полимеры* однофазны, однородны и изотропны. В зависимости от температуры они могут находиться в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем состояниях, что определяет их деформационное поведение под нагрузкой. Переход из высокоэластического состояния в стеклообразное (и наоборот) происходит при температуре стеклования  $T_{ст}$ , а переход в вязкотекучее состояние – при температуре текучести  $T_T$ . Температуры переходов не являются точными константами материала, а представляют собой некоторый температурный интервал. Аморфное строение имеют полимеры с разветвленной цепью или с нерегулярным строением (оргстекло, полистирол и др.), а также полимеры при температурах выше температуры плавления кристаллитов  $T_{пл}$ , когда кристаллографическая решетка разрушена за счет теплового движения молекул.

*Кристаллические полимеры* в основе своей структуры имеют участки с высокоупорядоченным расположением макромолекул, уложенных параллельно друг другу и образующих кристаллические конструкции со всеми характерными для кристаллов признаками. Эти участки обладают локальной анизотропией, но в силу их разнонаправленности материал в целом остается изотропным. Создание идеальной структуры с высокой степенью упорядоченности по всему объему кинетически затруднено, поэтому наряду с равновесными кристаллическими структурами возникают аморфные участки с хаотичным расположением молекул. Вследствие этого кристаллические полимеры всегда двухфазны и включают в себя кристаллические и аморфные области. Однако эти фазы неотделимы друг от друга, поскольку образованы одними и теми же макромолекулами, входящими одновременно в кристаллическую и аморфную области и пронизывающи-

ми структуру, связывая воедино все вещество. Поэтому строение кристаллических полимеров можно рассматривать как сложное сочетание аморфных и кристаллических участков различной степени упорядоченности. Количественное соотношение между этими фазами определяет степень кристалличности полимера [6]. Кристаллические полимеры характеризуются двумя температурными значениями – температурой стеклования  $T_{ст}$  (аморфная фаза) и температурой плавления  $T_{пл}$  (кристаллическая фаза).

Фторопласт-4 представляет собой *кристаллический полимер*, состоящий из кристаллических областей с упорядоченными участками правильных, параллельно уложенных, зигзагообразных спиральных цепей и аморфной фазы, заполняющей пространство между кристаллитами (рис. 2). Линейное строение молекул и отсутствие между ними поперечных связей обеспечивают высокую плотность их укладки и создание в полимере кристаллической фазы, практически заполняющей весь его объем [7]. Степень кристалличности фторопласта-4, полученная при полимеризации, очень высока и при плотности 2,2–2,3 г/см<sup>3</sup> составляет порядка 80–95%.

Кристаллическая фаза существенно влияет на механические свойства полимера и при высоком ее содержании его деформационное поведение в значительной степени определяется поведением кристаллической части структуры [8, 9].

Высокая степень кристалличности фторопласта-4 придает ему твердость, прочность и жесткость, что при указанных свойствах делает его механическое поведение подобным поведению классических твердых материалов. Поэтому, пренебрегая особенностями молекулярного строения, а также наличием и влиянием эластичной аморфной фазы, структуру фторопласта-4 с достаточно точным приближением можно рассматривать как *полностью кристаллическую, идеально сплошную, однородную и изотропную*, соответствующую материалам, изучаемым в *механике твердых деформируемых тел*.

С целью исследования возможности применения к расчету фторопласта-4 методов и подходов, принятых для этих материалов, рассмотрим изменения, возникающие в его структуре при температурно-силовых воздействиях (в частности, при холодном деформировании), и примем модель его механического поведения, способную быть описанной в рамках существующих теорий.

Известно, что всякое силовое воздействие сопровождается деформацией тела и конечный результат изменения размеров и формы детали зависит от схемы нагружения, величины нагрузки и физико-механических свойств материала. Существующие в настоящее время теории, описывающие деформационное поведение твердых тел (теории упругости, пластичности, разрушения и др.), наиболее полно разработаны для низкомолекулярных кристаллических материалов, для которых характерны только упругие и пластические деформации, протекающие по известным механизмам. Эти теории достаточно достоверны, проверены экспериментально и успешно используются в практике инженерных расчетов. Однако поведение полимеров принципиально отличается от поведения указанных твердых тел и деформации, возникающие в них под действием силового поля, имеют другую природу, величину, механизм развития.

При деформировании фторопласта-4 его полная деформация до момента разрушения складывается из *упругой, высокоэластической и остаточной деформаций*, каждая из которых отличается по величине, характеру проявления и имеет свой преимущественный температурный диапазон возникновения [10]:

$$\varepsilon_{\text{полн}} = \varepsilon_{\text{упр}} + \varepsilon_{\text{в.э}} + \varepsilon_{\text{ост}} \quad (1)$$

*Упругая* деформация во фторопласте-4 имеет такую же природу, как в любом твердом теле: связана с изменением межцентровых, межатомных расстояний и валентных углов, незначительная по величине, подчиняется закону Гука и, возникнув в начальный момент нагружения, сохраняется на протяжении всего процесса деформирования, вплоть до разгрузки или разрушения материала. Упругая деформация обратима и имеет мгновенный характер: со скоростью звука достигает своего зна-



Рис. 2. Структура фторопласта

чения и мгновенно исчезает после разгрузки, поэтому ее называют *мгновенной деформацией*. Она не зависит от температуры и при любых температурах нагружения является сопутствующей деформацией, однако при  $T < T_{ст}$  ( $T_{ст} = -120\text{ °C}$ ), когда аморфная фаза затвердевает, она становится преобладающей и единственной. Материал в таком состоянии представляет собой монолитное упруготвердое вещество, в котором вследствие низкой подвижности и гибкости макромолекул любое силовое воздействие способно привести лишь к незначительным деформациям. При таких температурах фторопласт-4 ведет себя как жесткий линейно-упругий материал, подчиняющийся законам механики твердого тела, однако, несмотря на высокую степень кристалличности, его деформационное поведение при этих температурах практически полностью определяется свойствами затвердевшей аморфной фазы и незначительно зависит от кристаллической фазы [7]. С понижением температуры и особенно при достижении температуры хрупкости  $T_{хр}$  многие полимеры охрупчиваются и легко разрушаются. Однако фторопласт-4 не имеет такой температуры, он сохраняет гибкость и не становится хрупким даже при температуре жидкого гелия ( $-269,3\text{ °C}$ ) [11].

При более высоких температурах ( $T \geq T_{ст}$ ) аморфная фаза размягчается и переходит в *высокоэластическое состояние*, а кристаллические области сохраняются твердыми, обеспечивая жесткость фторопласта-4 вплоть до температуры плавления кристаллитов ( $T_{пл} = +327\text{ °C}$ ). В высокоэластическом состоянии подвижность молекулярных звеньев возрастает, придавая макромолекулам аморфной фазы способность принимать различные конформации и возможность переориентации под действием внешнего силового поля. В результате таких изменений возникает *высокоэластическая деформация*, которая по своей природе, величине и физическому проявлению принципиально отличается от упругой (гуковской) деформации. Она свойственна исключительно полимерам и обусловлена их молекулярным строением, в котором длинные молекулярные цепи, обладая высокой подвижностью и внутренней гибкостью, способны в условиях силового воздействия разворачиваться, выпрямляться, изгибаться или принимать другие формы, ориентируясь в направлении силы и значительно изменяя размеры элемента. После разгрузки процесс происходит в обратном направлении до полного восстановления исходного состояния. Таким образом, высокоэластическая деформация обратима, но имеет релаксационный характер и требует для установления равновесного состояния некоторого промежутка времени. Поскольку она достигает конечного значения и исчезает при разгрузке не мгновенно, а со временем, ее называют *запаздывающей деформацией*.

Возникновение высокоэластической деформации определяется, главным образом, поведением аморфных участков, состоящих из свободных и хаотично расположенных макромолекул, имеющих возможность при нагружении принимать любые формы и создавать деформации большой величины. Молекулярные же цепи кристаллической структуры, входящие в кристаллографическую решетку, являются зафиксированными и неспособными к большим деформациям. Однако с возрастанием силового воздействия в кристаллитах также возникают процессы, принципиально изменяющие свойства материала и приводящие к возникновению необратимых деформаций.

С увеличением нагрузки на фоне высокоэластической деформации начинается внутренняя перестройка (*рекристаллизация*) структуры, при которой происходит полное разрушение старых и образование новых кристаллических структур, ориентированных по направлению силы и обладающих другими свойствами. В процессе рекристаллизации участвует не только кристаллическая фаза, но и аморфная фаза, молекулы которой, принимая упорядоченное строение, создают новые кристаллиты, увеличивая кристаллическую часть структуры. В результате при рекристаллизации степень кристалличности полимера возрастает и чем больше она становится, тем меньшее влияние на деформационный процесс оказывает аморфная фаза и тем большую значимость в формировании свойств материала приобретает кристаллическая фаза. Именно кристаллическая структура и происходящие в ней рекристаллизационные процессы определяют деформационное поведение материала в условиях силового поля.

Рекристаллизация, начавшись при определенной нагрузке, происходит далее за счет теплового движения молекул, не требующего силовых затрат, а поэтому протекает при постоянном напряжении  $\sigma_{рекр}$  (*напряжение рекристаллизации*), являющемся одной из важнейших механических характеристик полимера. Структурная перестройка приводит к изменению свойств материала и образованию *остаточных* деформаций так же, как это происходит в металлах при пластической деформации. Ввиду этого момент наступления рекристаллизации рассматривает-

ся как *предельное состояние* материала, а  $\sigma_{\text{рекр}}$  считается *предельным напряжением*. Однако в отличие от металлов образование необратимых деформаций в полимерах происходит в результате нескольких процессов: за счет деформаций, возникающих и закрепляющихся в новой (рекристаллизованной) структуре, а также за счет истинно пластических деформаций вследствие перемещения кристаллитов по плоскостям скольжения и дефектам [6, 8, 11].

Высококристаллические полимеры даже при наличии незначительной аморфной фазы также обладают способностью к высокоэластической деформации, проявляемой в большей или меньшей степени в зависимости от кристалличности материала. Фторопласт-4 при  $T \geq T_{\text{ст}}$  также переходит в высокоэластическое состояние, которое сохраняется вплоть до температуры разложения ( $T_p = +415^\circ\text{C}$ ). Особенность свойств фторопласта-4 заключается в его неспособности переходить в вязкотекучее состояние, при котором макромолекулы перемещаются относительно друг друга и материал ведет себя подобно жидкости. Переход аморфной фазы в текучее состояние происходит при температуре текучести  $T_t$ , однако у фторопласта-4 вследствие высокой молекулярной массы  $T_t > T_p$  (рис. 3). Следовательно после расплавления кристаллической фазы и образования полностью аморфной структуры фторопласт-4 не превращается в вязкую жидкость, а остается твердым высокоэластичным материалом [12]. Таким образом, фторопласт-4 способен находиться только в двух твердых физических состояниях – стеклообразном и высокоэластическом, сохраняемым до температуры разложения  $T_p$ . При достижении  $T_p$  происходит деструкция молекул и фторопласт-4 начинает разлагаться [6–10].

Исследования показывают, что *растяжение* фторопласта-4 в высокоэластическом состоянии может приводить к удлинениям без разрушения до 500%, при этом материал проявляет достаточно высокую жесткость, сохраняемую вплоть до  $T_{\text{пл}}$  (рис. 3) [13]. Это обеспечивается высокой степенью кристалличности фторопласта-4, которая еще больше возрастает вследствие рекристаллизационных процессов, возникающих при силовом воздействии. Исследования фторопласта-4 на *сжатие* также подтверждают его высокоэластичные свойства и способность к деформированию до больших (часто, необратимых) обжатий без нарушения целостности. Такие деформации могут возникать даже в условиях низких температур и при незначительных нагрузках, что определяется *хладотекучестью* фторопласта-4 и рассматривается как его существенный недостаток для деталей, работающих под нагрузкой, или деталей с жесткими допусками. Так, по причине *хладотекучести* фторопластовые уплотнения обнаруживают нарушение герметичности при повышении давления, в ненагруженных или незначительно нагруженных деталях возникают необратимые деформации, которые образуются даже от собственного веса изделия и т. д. Природа хладотекучести также заключается в рекристаллизационных процессах, приводящих к уплотнению структуры и увеличению степени кристалличности материала.

Таким образом, при воздействии силового поля и вследствие фазовых превращений кристалличность фторопласта-4 возрастает и его *структура приближается к почти полному однофазному упорядоченному кристаллическому состоянию*. Это еще раз подтверждает правомерность принятия для материала модели сплошного, твердого, однородного тела со всеми характерными свойствами, присущими низкомолекулярным твердым телам. Несмотря на специфику свойств фторопласта-4, можно с определенным допущением рассматривать его деформационное поведение до разрушения как процесс, включающий в себя только *упругую* и *остаточную* деформации. При этом следует подразумевать, что *упругая* деформация состоит из двух обратимых деформаций – истинно упругой (*мгновенной*) и высокоэластической (*запаздывающей*), принимая для

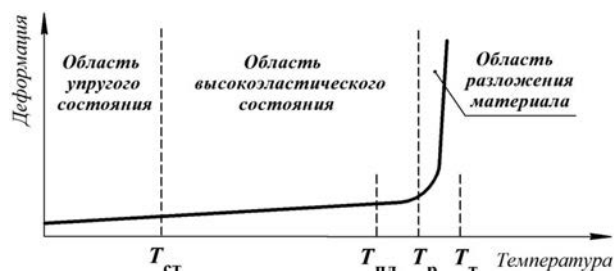


Рис. 3. Термомеханическая кривая фторопласта

обеих подчиненность закону Гука. Справедливость этого допущения по отношению к высокоэластической деформации, если ее величина не превышает 10%, подтверждается экспериментально [11]. Что касается *остаточной* (необратимой) деформации, то, как было отмечено выше, она является результатом рекристаллизационных процессов и истинно пластической деформации, возникающей в кристаллитах. Четкого разделения между этими

составляющими не существует и определить долю участия каждой из них в создании остаточных деформаций не представляется возможным. Однако, считая рекристаллизацию предельным состоянием материала и рассматривая ее как аналог пластической деформации в металлах, где важнейшей характеристикой прочности является предел текучести  $\sigma_T$ , такой величиной при расчете фторопластовых изделий следует считать  $\sigma_{\text{рекр}}$  – напряжение, при котором начинаются необратимые процессы и возникают необратимые деформации. Предел рекристаллизации  $\sigma_{\text{рекр}}$ , также называемый в литературе как предел хладотекучести или даже предел текучести (по аналогии с металлами), зависит от температуры и определяется по эмпирической формуле [11]:

$$\lg \sigma_{\text{рекр}} \text{ (МПа)} = -0,46834 + 483,64/T(\text{K}) \quad (2)$$

Следует заметить, что при деформировании кристаллических полимеров в силу сложности их строения в структуре могут возникать все деформации одновременно, проявляясь в большей или меньшей степени в зависимости от температуры [6]. Эта картина также характерна и для фторопласта-4: вследствие его высокой пластичности остаточная деформация в нем возникает даже при очень низких температурах и локально присутствует вместе с упругой, а затем и вместе с высокоэластической деформациями (рис. 4). Если при 4К она составляет всего несколько процентов, то с повышением температуры возрастает и при  $T \approx T_{\text{пл}}$  становится преобладающей деформацией [14].

**Заключение.** Анализ механического поведения фторопласта-4 в условиях силового воздействия показывает, что механизмы деформационных процессов, протекающих в полимере, по своему механическому проявлению во многом подобны механизмам, возникающим при деформировании классических твердых тел. Поэтому с учетом некоторых приближений и принятия определенной схематизации механических свойств материала становится возможным для математического описания деформационного поведения фторопласта-4 использование подходов и расчетных методик, разработанных в теориях упругости и пластичности для твердых деформируемых материалов. Возвращаясь к технологии изготовления фторопластовых колец [3, 4] и исследованию возможности их получения методом холодного деформирования, на основании проведенного анализа тогда можно предположить, что такая возможность реально осуществима, хотя и потребует выполнения определенных технологических приемов, связанных с релаксационными процессами, и соответствующего расчета инструмента, обеспечивающего получение готовых колец требуемого диаметра. Согласно исследованиям, процессы релаксации во фторопласте-4 при его деформировании в условиях комнатной температуры протекают в достаточно коротком промежутке времени и требуют для достижения деформациями конечной величины выдержки детали под нагрузкой в течение 3–4 ч [8, 15]. Что касается проектирования инструмента, то оправка для наматывания ленты должна быть рассчитана таким образом, чтобы после разгрузки и упругого пружинения конечный диаметр кольца соответствовал требуемому техническому размеру.

Возможность изготовления изделий из фторопласта-4 методом холодного формования в значительной степени определяется свойством хладотекучести материала, которое считается недостатком, однако в данной технологии является неоспоримым достоинством, позволяющим получать изделия требуемых размеров и формы при низкой температуре и невысоких нагрузках. Такой подход позволит за счет устранения из технологического процесса этапов нагрева и термофиксации детали сократить продолжительность рабочего цикла, увеличить производительность процесса и снизить его стоимость.

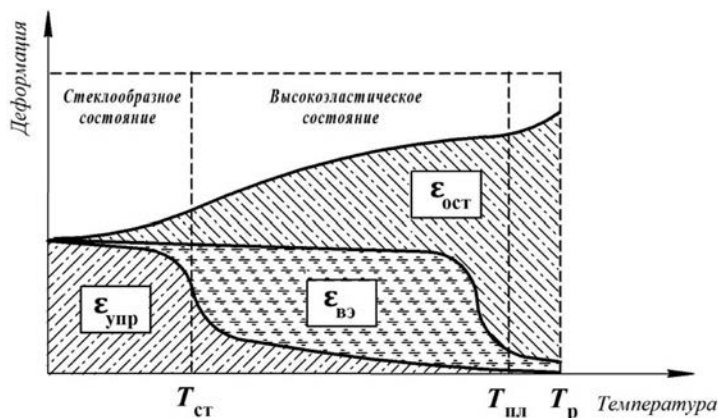


Рис. 4. Деформации в структуре фторопласта

### Список использованных источников

1. Брацьких, Е. А. Технология пластических масс / Е. А. Брацьких, Э. С. Шульгина. – Л.: Химия, 1982. – 328 с.
2. Пугачев, А. К. Переработка фторопластов в изделия / А. К. Пугачев, О. А. Росляков. – Л.: Химия, 1987. – 168 с.
3. Вершина, Г. А. Способ изготовления разрезного кольца из полимерного материала и устройство для его осуществления / Г. А. Вершина, А. Ю. Пилатов. Патент Республики Беларусь, ВУ № 14191, 2011.
4. Вершина, Г. А. Способ изготовления разрезных защитных колец из полимерного материала / Г. А. Вершина, А. Ю. Пилатов. Патент Республики Беларусь, ВУ № 19073, 2015.
5. Марихин, В. А. Надмолекулярная структура полимеров / В. А. Марихин, Л. П. Мясникова. – Л.: Химия, 1977. – 240 с.
6. Тагер, А. А. Физико-химия полимеров / А. А. Тагер. – М.: Химия, 1968. – 536 с.
7. Привалко, В. П. Молекулярное строение и свойства полимеров / В. П. Привалко. – Л.: Химия, 2006. – 238 с.
8. Каргин, В. А. Структура и механические свойства полимеров / В. А. Каргин. – М.: Наука, 1979. – 449 с.
9. Гуль, В. Е. Структура и механические свойства полимеров / В. Е. Гуль, В. Н. Кулезнев. – М.: Лабиринт, 1994. – 370 с.
10. Тугов, И. И. Химия и физика полимеров / И. И. Тугов, Г. И. Кострыкина. – М.: Химия, 2009. – 432 с.
11. Кнунянц, И. Л. Краткая химическая энциклопедия / И. Л. Кнунянц. В 3-х т. Т. 3. – М., 2013. – 560 с.
12. Кулезнев, В. Н. Химия и физика полимеров / В. Н. Кулезнев, В. А. Шершнева. – М.: Высшая школа, 1988. – 312 с.
13. Карякина, М. И. Технология полимерных покрытий / М. И. Карякина, В. Е. Попцов. – М.: Химия, 1983. – 336 с.
14. Циклис, Д. С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях / Д. С. Циклис. – М.: Химия, 1965. – 416 с.
15. Климов, И. Я. Коррозия химической аппаратуры и коррозионноустойчивые материалы / И. Я. Климов. – М.: Машиностроение, 1967. – 468 с.

### References

1. Bratsykhin, E. A. and Shul'gina, E. S. (1982), *Tekhnologiya plasticheskikh mass* [Technology of plastics], Khimiya, Leningrad, RU.
2. Pugachev, A. K. and Roslyakov, O. A. (1987), *Pererabotka ftoroplastov v izdeliya* [Processing fluoroplastic in products], Khimiya, Leningrad, RU.
3. Vershina, G. A. and Pilatov, A. Ju. (2011), *Sposob izgotovleniya razreznogo kol'tsa iz polimernogo materiala i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya* [Way of manufacturing of a cutting ring from a polymeric material and the device for its realisation], Baza patentov Respubliki Belarus, BY, Pat. 14191.
4. Vershina, G. A. and Pilatov, A. Ju. (2015), *Sposob izgotovleniya razreznnykh zashchitnykh kolets iz polimernogo materiala* [Way of manufacturing of cutting protective rings from a polymeric material], Baza patentov Respubliki Belarus', BY, Pat. 19073.
5. Marikhin, V. A. and Myasnikova, L. P. (1977), *Nadmolekulyarnaya struktura polimerov* [Supramolecular structure of polymers], Khimiya, Leningrad, RU.
6. Tager, A. A. (1968), *Fiziko-khimiya polimerov* [Fiziko-himiya polymers], Khimiya, Moscow, RU.
7. Privalko, V. P. (2006), *Molekulyarnoe stroenie i svoistva polimerov* [Molecular structure and properties of polymers], Khimiya, Leningrad, RU.
8. Kargin, V. A. (1979), *Struktura i mekhanicheskie svoistva polimerov* [Structure and mechanical properties of polymers], Nauka, Moscow, RU.
9. Gul', V. E. and Kuleznev, V. N. (1994), *Struktura i mekhanicheskie svoistva polimerov* [Structure and mechanical properties of polymers], Labirint, Moscow, RU.
10. Tugov, I. I. and Kostrykina, G. I. (2009), *Himiya i fizika polimerov* [Chemistry and physics of polymers], Khimiya, Moscow, RU.
11. Knunyants, I. L. (2013), *Kratkaya khimicheskaya entsiklopediya* [Short chemical encyclopedia. In three volumes. Volume 1], Ripol Klassik, Moscow, RU.
12. Kuleznev, V. N. and Shershnev, V. A. (1988), *Khimiya i fizika polimerov* [Chemistry and physics of polymers], Vysshaya shkola, Moscow, RU.
13. Karyakina, M. I. and Poptsov, V. E. (1983), *Tekhnologiya polimernykh pokrytii* [Technology of polymeric coverings], Khimiya, Moscow, RU.
14. Tsiklis, D. S. (1965), *Tekhnika fiziko-khimicheskikh issledovaniy pri vysokikh i sverkhvysokikh davleniyakh* [Technique of physical and chemical researches with high and ultrahigh pressures], Khimiya, Moscow, RU.
15. Klimov, I. Ya. (1967), *Korroziya khimicheskoi apparatury i korroziionnostoikie materialy* [Corrosion of the chemical equipment and corrosion-resistant materials], Mashinostroenie, Moscow, RU.

### Информация об авторах

Вершина Георгий Александрович – кандидат технических наук, доцент, первый проректор. Белорусский национальный технический университет (220005, г. Минск, проспект Независимости, 65, Беларусь).

Реут Лариса Ефимовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов машиностроительного профиля. Белорусский национальный технический университет (220005, г. Минск, проспект Независимости, 65, Республика Беларусь). E-mail: sopromat\_reut@mail.ru.

### Для цитирования

Вершина, Г. А. Анализ деформационного поведения фторопласта-4 в условиях силового воздействия / Г. А. Вершина, Л. Е. Реут // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 23–30

### Information about the authors

Vershina Georgiy Aleksandrovich – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, First Vice-Rector. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220005, Minsk, Belarus).

Reut Larisa Efimovna – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, the Department of resistance of materials of a machine-building profile. Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220005, Minsk, Belarus). E-mail: sopromat\_reut@mail.ru.

### For citation

Vershina G. A., Reut L. E. Analysis of deformation behaviour of fluoroplastic-4 in the conditions of power influence. Proceedings of the National academy of sciences of Belarus, physical-technical series. 2016, no. 4, pp. 23–30.