

SSN 0002-3566 (print)

УДК 541.12

Поступила в редакцию 05.01.17

Received 05.01.17

Г. А. Вершина, Л. Е. Реут*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь***УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ ФТОРОПЛАСТОВОЙ ЛЕНТЫ
ПРИ СВРАЧИВАНИИ В КОЛЬЦО**

В работе рассматривается технологический процесс изготовления уплотнительных фторопластовых колец из ленточной заготовки и исследуется возможность их получения методом холодной навивки ленты на цилиндрическую оправку и разрезания спирали на кольца без последующей операции нагрева и термофиксации размеров. Основанием для принятия такой технологии является анализ механических свойств фторопласта-4 и его деформационное поведение в условиях силового воздействия. Исследования показывают, что высокая пластичность материала и склонность фторопласта-4 к хладотекучести способствуют возникновению необратимых деформаций при низких температурах и невысоких нагрузках и делают возможной получение фторопластовых изделий методом холодного формования реально осуществимой, подобно тому, как это происходит в металлах, но с учетом особенностей свойств полимера. Поскольку процесс перестройки структуры и достижение ею равновесного состояния имеет релаксационный характер, необходимым этапом холодного формоизменения является выдержка изделия под нагрузкой в течение времени, требуемого для сохранения детали заданных размеров. При этом точность размеров получаемых колец в значительной степени определяется точностью инструмента (цилиндрического калибра), на который производится навивка ленты. Рассматривая данную схему деформирования как чистый изгиб, при котором в заготовке возникают области растяжения и сжатия, и принимая для фторопласта модель твердого деформируемого тела с возможностью возникновения упругих и остаточных деформаций, авторами впервые обосновано и доказано, что при сжатии фторопласт-4 ведет себя как жестко-пластичный материал, а при растяжении модель его поведения соответствует упругопластичному материалу, сохраняющему даже при значительных необратимых изменениях некоторую долю упругих деформаций. Это приводит к пружинению детали после разгрузки и изменению проектного размера, что следует учитывать при разработке технологического процесса и проектировании инструмента. Авторами разработана методика расчета калибровочного инструмента с учетом эффекта упругого последельствия в изделии, позволяющая получать фторопластовые кольца требуемых размеров и формы. Полученные результаты являются достоверными и подтверждены экспериментально.

Ключевые слова: фторопласт, структура, механические свойства, модель материала, деформационное поведение при силовом нагружении, упругие и остаточные деформации, рекристаллизация, холодное формоизменение заготовки, изгиб ленты, модель поведения при растяжении и сжатии, пружинение, расчет инструмента

G. A. Vershina, L. E. Reut*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***ELASTO-PLASTIC BENDING OF A FLUOROPLASTIC TAPE AT BENDING IN A RING**

A technological process of production of sealing fluoroplastic rings from a band workpiece is considered and the possibility of their production by a method of cold coiling of the tape on a cylindrical mandrel is investigated; the helix is cut in rings without subsequent heating operation and thermal fixing of sizes. The basis for adoption of such a technology is the analysis of mechanical properties and deformation behavior of fluoroplastic-4 in the conditions of power influence. Researches show that high plasticity of material and tendency of fluoroplastic-4 to cold flow contribute to emergence of irreversible deformations at low temperatures and low loadings and make possible obtaining fluoroplastic products by method of cold formation just as it occurs in metals, but taking into account particularities of polymer properties. Since the process of reorganization of structure and achievement of the equilibrium state has relaxation character, a necessary stage of cold forming is the endurance of a product under loading during the time required for preservation of given sizes by a detail. At the same time the accuracy of sizes of obtained rings is substantially defined by the tool accuracy (cylindrical caliber) on which is produced by winding of the tape. Considering this scheme of deformation as a pure bending at which there are areas of stretching and compression in a billet, and accepting for a fluoroplastic a model of a solid deformable body with possibility of elastic and residual deformations, it is for the first time proved by authors that fluoroplastic-4 behaves at compression as a rigid and plastic material, and at stretching the model of its behavior corresponds to elastic-plastic material. It means that zone of compression is completely captured by irreversible deformation and its sizes after unloading aren't restored, and stretching zone even at

considerable irreversible changes keeps some share of elastic deformations. After unloading, even after completion of relaxation processes, it leads to springing and, as a result, to partial restoration of its form and changes of its design size that should be considered during the development of technological process and designing of the tool. Authors have developed the method of calculation of the calibration tool taking into account effect of elastic after-effect in a product allowing obtaining fluoroplastic rings of required sizes and forms. The obtained results are reliable and are confirmed experimentally.

Keywords: fluoroplastic, structure, mechanical properties, material model, deformation behavior at power loading, elastic and residual deformations, recrystallization, cold forming of preparation, bending of a tape, behavior model at stretching and compression, springing, calculation of the tool

Введение. Полимеры занимают одно из ведущих мест среди конструкционных материалов и широко используются в различных отраслях промышленности и народного хозяйства. Благодаря своим уникальным свойствам они применяются в радиоэлектронике и приборостроении, в электротехнической, химической и пищевой промышленности, в сельском хозяйстве и медицине, военной и космической технике. Однако особую значимость они приобретают в машиностроительном и строительном производстве. Высокая востребованность полимерных изделий обусловлена особенностями их свойств, обеспечивающих требуемые эксплуатационные качества в различных температурно-силовых условиях, что в сочетании с высокой прочностью и долговечностью материала, простотой его обработки и переработки, а также возможностью получения химическим путем в любом количестве и с любыми заданными свойствами делает полимеры для определенных назначений практически незаменимыми [1].

Достойное место в ряду полимерных конструкционных материалов занимают фторопласт и модификации на его основе. Высокие эксплуатационные характеристики фторопласта-4 – химическая инертность к любым агрессивным средам, уникальная для пластмасс термостойкость и морозостойкость, высокие антифрикционные свойства и гидрофобность, а также прочность и эластичность материала, сохраняемые в диапазоне температур от -269 до $+260$ °С, – обеспечивают фторопласту широкое применение в узлах и механизмах различных машиностроительных конструкций. Из фторопласта-4 изготавливают изделия самых разнообразных форм, однако, учитывая, что вследствие высокой молекулярной массы материал не способен переходить в текучее состояние, а значит, не может быть подвергнут экструзии, основным технологическим процессом изготовления изделий является холодное прессование и спекание порошкообразного полимера с последующей механической обработкой заготовки для придания ей готовой формы. Среди всех существующих полимеров фторопласт-4 обладает самой высокой плотностью ($2,2-2,3$ г/см³), что обеспечивает хорошую податливость при обработке резанием – сверлении, фрезеровании, точении, шлифовании, а также имеет высокую деформируемость, проявляемую даже при низких температурах и позволяющую изготавливать фторопластовые изделия методами силового формоизменения [2, 3].

Цель работы. В работе рассматривается технологический процесс изготовления уплотнительных фторопластовых колец, получаемых из ленточной заготовки путем ее наматывания на цилиндрическую оправку с последующими нагреванием, термофиксацией и разрезкой на кольца [4, 5]. В сравнении с существующими технологиями данный метод обладает рядом преимуществ, связанных со значительным снижением отходов производства и повышением производительности за счет автоматизации полного производственного цикла. 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.

Целью работы является исследование возможности изготовления колец методом *холодной навивки* ленты на цилиндрическую оправку и разрезания спирали на кольца без последующей их термофиксации, а также расчет инструмента, обеспечивающего получение изделий требуемого диаметра.

Анализ свойств фторопласта и обоснование метода. Следует заметить, что вопрос холодного формования полимеров, подобно холодной обработке давлением металлических материалов (холодная прокатка, штамповка, гибка, волочение, накатка резьбы, навивка пружин и т. д.), давно рассматривается в качестве возможной технологии получения полимерных изделий как

наиболее экономичной по сравнению с горячим формованием и наименее отходной по сравнению с обработкой резанием. Основанием для принятия такой технологии является анализ механических свойств фторопласта-4 и его поведения в условиях силового воздействия [6], который показывает, что получение фторопластовых изделий *методом холодного формования* реально осуществимо и основано на *высокой пластичности* материала, способной для придания готовому изделию требуемых размеров и формы обеспечить создание в нем необходимых остаточных деформаций, а также на склонности фторопласта-4 к *хладотекучести*, способствующей возникновению необратимых деформаций при низких температурах и невысоких нагрузках. При этом, учитывая релаксационный характер процесса, требующий времени для перестройки структуры и достижения равновесного состояния, при холодном формовании необходима выдержка изделия под нагрузкой в течение 3–4 ч [7], после чего деформации достигают конечной величины и размеры детали уже не изменяются. Однако после разгрузки происходит некоторое пружинение и частичное восстановление формы, также протекающее во времени, поэтому для получения изделий требуемых размеров эффект упругого последействия должен быть учтен при проектировании инструмента.

Расчетная модель фторопласта. Постановка и решение задачи. Для теоретического описания и расчета технологического процесса необходимо принятие структурной модели материала, модели его деформационного поведения в условиях силового поля, а также силовой модели нагружения, устанавливающей вид деформации, которая возникает при формоизменении фторопластовой ленты.

На основании проведенного анализа установлено, что вследствие высокой степени кристалличности, полученной при полимеризации и рекристаллизационных процессах, структуру фторопласта-4 с достаточно точным приближением можно рассматривать как *полностью кристаллическую, сплошную и однородную*, соответствующую строению материалов, изучаемых в механике твердых деформируемых сред, а его механическое поведение – аналогичным поведению указанных материалов, считая, что во фторопласте при нагружении также возникают только *упругие* и *остаточные* деформации. При этом *упругая* деформация рассматривается как суммарная, состоящая из истинно упругой и высокоэластической деформаций, для которых (до определенных значений последней) принимается подчиненность закону Гука [8], а *остаточная* деформация является результатом рекристаллизации и истинно пластической деформации, возникающей в кристаллитах [6]. Что касается силовой модели нагружения, то сворачивание ленточной заготовки в кольцо путем наматывания на цилиндрическую оправку [4, 5] соответствует деформации *чистого изгиба*, что позволяет при расчете изделия использовать методы и подходы, принятые в *теории изгиба твердых деформируемых тел*. И поскольку изгиб сопровождается растяжением и сжатием волокон, при выполнении расчетов в качестве механических данных материала следует использовать прочностные характеристики фторопласта-4, определяющие его поведение именно при растяжении и сжатии.

Изготовление колец методом силового формоизменения предполагает создание в детали необратимых остаточных деформаций, и поскольку они возникают вследствие рекристаллизации, то фазовая перестройка, подобно пластической деформации в металлах, рассматривается как *предельное состояние* материала. Поэтому при выполнении расчетов основной механической характеристикой является *предел рекристаллизации* $\sigma_{\text{рекр}}$ – предельное напряжение, соответствующее началу необратимых процессов и возникновению необратимых деформаций. В различных литературных источниках по полимерным материалам встречаются и другие названия и обозначения для предела рекристаллизации, например, предел хладотекучести $\sigma_{\text{хл}}$, предел текучести $\sigma_{\text{т}}$ (по аналогии с металлами) и т. д., однако по своему физическому смыслу они одинаковы и обозначают напряжение, при котором в кристаллическом полимере начинаются необратимые процессы рекристаллизации. При этом напряжение $\sigma_{\text{т}}$ никак не связано с текучестью полимера, то есть его переходом в текучее (жидкое) состояние, однако именно такое обозначение для напряжения рекристаллизации встречается в литературе чаще всего. Поэтому, чтобы не нарушить терминологию используемых понятий и сохранить соответствие литературным источникам, в приведенных ниже расчетах напряжение рекристаллизации $\sigma_{\text{рекр}}$ будет обозначаться как

σ_T – напряжение, при котором происходят структурные изменения и возникают остаточные деформации. При этом, учитывая, что рекристаллизационные процессы во фторопласте-4 при растяжении и при сжатии начинаются при различных напряжениях, в приведенных ниже расчетах будут использованы соответствующие для этих деформаций обозначения: $\sigma_{T(сж)}$ и $\sigma_{T(раст)}$. Необходимо также принять во внимание и различие в характере деформаций, возникающих во фторопласте при растяжении и при сжатии. Согласно принятой модели деформационного поведения, полная деформация при нагружении представляет собой сумму двух составляющих – упругой деформации ($\epsilon_{упр} + \epsilon_{в.э}$), исчезающей после разгрузки, и остаточной $\epsilon_{ост}$, сохраняемой материалом. Исследования показывают, что при сжатии фторопласта в его структуре практически полностью образуются необратимые остаточные деформации, а упругие деформации столь незначительны, что размеры образца не восстанавливаются даже с течением времени [9, 10]. Такое поведение фторопласта при *сжатии* позволяет принять для него модель *жестко-пластичного материала* (рис. 1, а), для которого упругими деформациями пренебрегают и в расчетах не учитывают. При *растяжении* фторопласт ведет себя как *упругопластичный материал* (рис. 1, б), сохраняющий даже при значительных необратимых изменениях некоторую долю упругих деформаций. После разгрузки эти деформации приводят к пружинению и частичному восстановлению формы, изменяя проектный размер детали, поэтому эффект упругого последствия необходимо учитывать при расчете технологического процесса и проектировании инструмента.

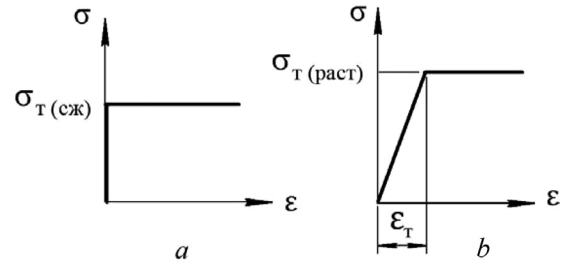


Рис. 1. Механическая модель фторопласта при сжатии (а), при растяжении (б)
 Fig. 1. Mechanical model of a fluoroplastic at compression (а), at stretching (б)

Рассмотрим процесс наматывания фторопластовой ленты прямоугольного сечения (рис. 2, а) на цилиндрическую оправку диаметром $d_{опр}$ (рис. 2, б) с целью придания заготовке кольцеобразной формы (рис. 2, с).

Согласно классической теории упругости принимаем $\sigma = E\epsilon$ и на основании гипотезы плоских сечений считаем, что деформации и напряжения по высоте сечения изменяются по линейному закону и подчиняются зависимостям [11]

$$\epsilon = y / \rho; \quad \sigma = E (y / \rho), \tag{1}$$

где ρ – радиус кривизны ($1/\rho$ – кривизна) изогнутой оси ленты; y – расстояние от нейтральной оси до точки сечения, в которой возникают указанные ϵ и σ (рис. 3, а).

Изгибающий момент в сечении определяется интегралом вида (рис. 3, а, б) [12, 13]

$$M_{изг} = \int_A \sigma y dA = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma y b dy. \tag{2}$$

Разбиваем интеграл (2) на зоны растяжения и сжатия и, учитывая, что в каждой из них фторопласт подчиняется соответствующей модели поведения – в области сжатия является *жестко-пластичным*, а в области растяжения – *упругопластичным*, определяем для каждой из них значение $M_{изг}$ [14, 15].

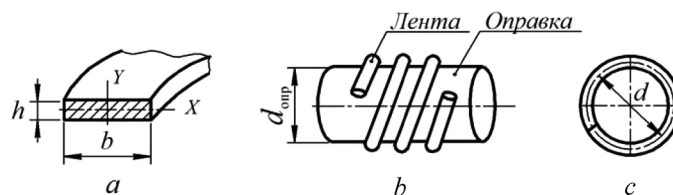


Рис. 2. Схема наматывания ленты на оправку
 Fig. 2. The scheme of winding of a tape on a mandrel

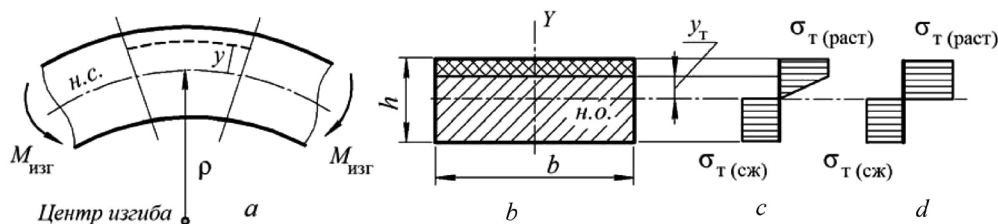


Рис. 3. Изгиб ленты и характер изменения напряжений в сечении

Fig. 3. Bending of a tape and character of change of tension in section

В зоне сжатия напряжения от нейтральной оси до края сечения постоянны и имеют значение $\sigma = \sigma_{T(сж)}$ (рис. 3, a, b). Тогда изгибающий момент $M_{изг(сж)}$ в этой области равен

$$M_{изг(сж)} = \int_{-h/2}^0 \sigma(-y) b dy = |\sigma = \sigma_{T(сж)}| = \frac{\sigma_{T(сж)} b h^2}{8}. \quad (3)$$

В зоне растяжения возникают две деформации: от нейтральной оси до точек $y = y_T$ имеет место упругая деформация с напряжениями $\sigma = E_{раст}(y/\rho)$, а от уровня y_T до края сечения – остаточная, в которой $\sigma = \sigma_{T(раст)}$ (рис. 3, a, b). И тогда изгибающий момент $M_{изг(раст)}$ в области растяжения соответственно равен

$$\begin{aligned} M_{изг(раст)} &= \int_0^{y_T} \sigma y b dy + \int_{y_T}^{+h/2} \sigma_{T(раст)} y b dy = \int_0^{y_T} E_{раст} \frac{y}{\rho} y b dy + \int_{y_T}^{+h/2} \sigma_{T(раст)} y b dy = \\ &= \frac{E_{раст} b y_T^3}{3\rho} + \frac{\sigma_{T(раст)} b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - y_T^2 \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Уровень сечения $y = y_T$ является границей между зоной упругих и зоной остаточных деформаций (рис. 3, b), в точках которой деформации и напряжения соответствуют значениям $\varepsilon = \varepsilon_T$ и $\sigma = \sigma_{T(раст)}$ (см. рис. 1, b). Тогда на основании выражений (1) имеем

$$y_T = \varepsilon_T \rho = \frac{\sigma_{T(раст)}}{E_{раст}} \rho. \quad (5)$$

Подставляем выражение (5) в (4) и после преобразования получаем окончательное значение изгибающего момента в зоне растяжения

$$M_{изг(раст)} = \frac{\sigma_{T(раст)} b h^2}{8} - \frac{\sigma_{T(раст)}^3 \rho^2 b}{6E_{раст}^2}. \quad (6)$$

Полный изгибающий момент в сечении на основании (3) и (6) равен

$$M_{изг} = M_{изг(сж)} + M_{изг(раст)} = \frac{b h^2}{8} (\sigma_{T(сж)} + \sigma_{T(раст)}) - \frac{\sigma_{T(раст)}^3 \rho^2 b}{6E_{раст}^2}, \quad (7)$$

откуда определяем полную кривизну изогнутой оси ленты, создаваемую суммарным действием упругих и остаточных деформаций

$$\frac{1}{\rho_{полн}} = \sqrt{\frac{\frac{\sigma_{T(раст)}^3 b}{6E_{раст}^2}}{\frac{b h^2}{8} (\sigma_{T(раст)} + \sigma_{T(сж)}) - M_{изг}}}. \quad (8)$$

Совершенно очевидно, что с увеличением момента $M_{\text{изг}}$ кривизна ($1/\rho$) изогнутой ленты будет возрастать, что согласуется с теорией изгиба и подтверждается полученным выражением (8). Но при достижении моментом предельного значения

$$M_{\text{изг}} = M_{\text{пр}} = \frac{bh^2}{8} (\sigma_{\text{T(раст)}} + \sigma_{\text{T(сж)}}) \quad (9)$$

кривизна элемента становится равной $1/\rho = \infty$, $\rho = 0$ и $y_{\text{T}} = 0$ (5), что соответствует случаю, когда все сечение целиком (теперь не только в области сжатия, но и в области растяжения) охвачено остаточной деформацией (рис. 3, с). Однако поскольку кривизна не может обратиться в бесконечность, такая ситуация в действительности не осуществима и указанный предельный случай является чисто теоретическим. Кривизна элемента с продвижением необратимой деформации к нейтральной оси будет оставаться конечной до тех пор, пока в сечении будет существовать упругая зона. Поэтому применимость формулы (8) следует ограничивать не только *сверху*, то есть наличием областей с полностью необратимыми деформациями, но и *снизу*, когда в сечении имеют место только упругие области, а остаточные полностью отсутствуют [13, 14].

Определим значение изгибающего момента $M_{\text{изг}}$ при котором в растянутой части сечения возникают только упругие деформации, учитывая, что сжатая область является жестко-пластичной и упругих деформаций здесь нет. Кривизна элемента при упругих деформациях определяется формулой, выражающей закон Гука при изгибе [12, 13],

$$\frac{1}{\rho_{\text{упр}}} = \frac{M_{\text{упр}}}{E_{\text{раст}} I_x} = \left| I_x = \frac{bh^3}{12} \right| = \frac{12 M_{\text{упр}}}{E_{\text{раст}} bh^3}. \quad (10)$$

Наибольший изгибающий момент $M_{\text{изг}}$, до которого вся область растяжения испытывает только упругие деформации, определим через напряжения, приравняв последние к предельному значению $\sigma_{\text{T(раст)}}$, возникающему на краю сечения,

$$\sigma = \frac{M_{\text{упр}}}{W_x} = \left| W_x = \frac{bh^2}{6} \right| = \frac{6 M_{\text{упр}}}{bh^2} = \sigma_{\text{T(раст)}},$$

откуда

$$M_{\text{упр}} = \frac{bh^2 \sigma_{\text{T(раст)}}}{6}. \quad (11)$$

Тогда использование формулы (8) возможно только для значений изгибающего момента в пределах $M_{\text{упр}} \leq M_{\text{изг}} \leq M_{\text{пр}}$, равных на основании выражений (9) и (11)

$$\frac{bh^2 \sigma_{\text{T(раст)}}}{6} \leq M_{\text{изг}} \leq \frac{bh^2}{8} (\sigma_{\text{T(раст)}} + \sigma_{\text{T(сж)}}), \quad (12)$$

когда остаточная деформация (хотя бы частично) охватывает зону растяжения. Чем ближе значение $M_{\text{изг}}$ лежит к правой части выражения (12), тем большую кривизну будет иметь изогнутый элемент и тем большие области будут охвачены необратимыми остаточными деформациями, обеспечивающими сохранение размеров и формы изделия. Соответственно, при значениях $M_{\text{изг}}$ близких к левой части выражения (12), большая часть растянутой области сечения будет деформирована упруго. И поскольку $M_{\text{изг}}$ не может принимать предельное значение (9), значит, в области растяжения всегда будут присутствовать упругие деформации, которые, исчезая после снятия нагрузки, будут возвращать элемент к исходному состоянию, восстанавливая в той или иной степени его первоначальные размеры и форму.

Тогда остаточная кривизна ленты, сохраняемая ею после разгрузки и исчезновения упругих деформаций, на основании формул (8) и (10) может быть определена как

$$\frac{1}{\rho_{\text{ост}}} = \frac{1}{\rho_{\text{полн}}} - \frac{1}{\rho_{\text{упр}}} = \sqrt{\frac{\frac{\sigma_{\text{T(раст)}}^3 b}{6 E_{\text{раст}}^2}}{\frac{bh^2}{8} (\sigma_{\text{T(раст)}} + \sigma_{\text{T(сж)}}) - M_{\text{изг}}} - \frac{12 M_{\text{изг}}}{E_{\text{раст}} bh^3}}. \quad (13)$$

Величина остаточной деформации определяет, по сути, размеры готового изделия. Поскольку последние определены техническим заданием и заранее известны, значит, остаточную деформацию, то есть остаточную кривизну заготовки ($1/\rho_{\text{ост}}$), следует считать величиной заданной. На основании этого по формуле (13) можно вычислить значение момента $M_{\text{изг}}$, действующего в сечении, а далее по формуле (8) – полную кривизну заготовки ($1/\rho_{\text{полн}}$) в момент ее изгиба, по которой определить необходимый размер инструмента, обеспечивающий такую деформацию.

Возвращаясь к вопросу изготовления кольцевых деталей, получаемых путем навивки фторопластовой ленты на цилиндрическую оправку [4, 5], на основании предложенной методики расчета диаметр готового кольца, замеренный по оси ленты (рис. 2, с), будет определяться как $d = 2\rho_{\text{ост}}$, а диаметр оправки, обеспечивающий этот размер, может быть вычислен по формуле

$$d_{\text{опр}} = 2\rho_{\text{полн}} - 2(h/2) = 2\rho_{\text{полн}} - h. \quad (14)$$

Совершенно очевидно, что $d > d_{\text{опр}}$, поэтому изготовлению *одного готового кольца* диаметром d соответствует число витков n заготовки на оправке, равное

$$\pi(d - h) = \pi d_{\text{опр}} n, \quad \text{откуда} \quad n = \frac{(d - h)}{d_{\text{опр}}}. \quad (15)$$

В таблице приведены расчетные значения $M_{\text{изг}}$, $\rho_{\text{полн}}$, $d_{\text{опр}}$ и n для других размеров d фторопластовых колец, производимых по технологии [4, 5].

Показатель	Диаметр фторопластового кольца, мм								
	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$M_{\text{изг}}$, Н·мм	76,25	75,82	75,42	75,10	74,78	74,48	74,25	73,99	73,81
$\rho_{\text{полн}}$, мм	10,5	11,7	12,7	13,5	14,2	14,8	15,3	15,8	16,2
$d_{\text{опр}}$, мм	19,0	21,4	23,4	25,0	26,4	27,6	28,6	29,6	30,4
n , витков	2,0	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,5	3,7	4,0

Следует заметить, что результаты расчетов, представленные в таблице, получены с использованием конкретных физико-механических данных ($\sigma_{\text{T(раст)}}$, $\sigma_{\text{T(сж)}}$, $E_{\text{раст}}$), указанных для фторопласта в справочной литературе. Однако в различных литературных источниках по полимерным материалам эти значения отличаются и в значительной степени зависят от условий нагружения (температуры, скорости и т. д.). Поэтому при рассмотрении определенной технологии и выполнении проектных расчетов необходимо проведение экспериментальных исследований и определение механических свойств материала для каждого конкретного случая. Это позволит получить более корректные результаты и обеспечит точность расчета, соответствующую данной технологии.

Заключение. Предложенная методика расчета технологического процесса изготовления фторопластовых колец дает достаточно достоверные результаты, подтверждаемые экспериментально, что позволяет считать вполне допустимым принятие для фторопласта *модели сплошного твердого деформируемого тела* и применение для описания его механического поведения методов и подходов, принятых в классической теории упругости и пластичности, разработанной для низкомолекулярных материалов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шур, А. М. Высокомолекулярные соединения / А. М. Шур. – М.: Высш. шк., 1981. – 656 с.
2. Привалко, В. П. Молекулярное строение и свойства полимеров / В. П. Привалко. – Л.: Химия, 2006. – 238 с.
3. Каргин, В. А. Структура и механические свойства полимеров / В. А. Каргин. – М.: Наука, 1979. – 449 с.
4. Способ изготовления разрезного кольца из полимерного материала и устройство для его осуществления : пат. Респ. Беларусь 14191 ; МПК F16J 9/00, B21F 11/00 / Г. А. Вершина, А. Ю. Пилатов. – Оpubл.: 30.04.2011.
5. Способ изготовления разрезных защитных колец из полимерного материала : пат. Респ. Беларусь 19073 / Г. А. Вершина, А. Ю. Пилатов. – Оpubл.: 30.04.2015.
6. 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.
7. Кнунянц, И. Л. Краткая химическая энциклопедия : в 5 т. / И. Л. Кнунянц. – М.: Совет. Энцикл., 1964. – Т. 3. – 560 с.
8. Тугов, И. И. Химия и физика полимеров / И. И. Тугов, Г. И. Кострыкина. – М.: Химия, 2009. – 432 с.
9. Циклис, Д. С. Техника физико-химических исследований при высоких и сверхвысоких давлениях / Д. С. Циклис. – М.: Химия, 1965. – 416 с.
10. Гуль, В. Е. Структура и механические свойства полимеров / В. Е. Гуль, В. Н. Кулезнев. – М.: Лабиринт, 1994. – 370 с.
11. Тимошенко, С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1979. – 566 с.
12. Биргер, И. А. Сопротивление материалов / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
13. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М.: Наука, 1967. – 550 с.
14. Самуль, В. И. Основы теории упругости и пластичности / В. И. Самуль. – М.: Высш. шк., 1970. – 288 с.
15. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

References

1. Shur A. M. *High-molecular connections*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1981. 656 p. (in Russian).
2. Privalko V. P. *Molecular structure and properties of polymers*. Leningrad, Himiya Publ., 2006. 238 p. (in Russian).
3. Kargin V. A. *Structure and mechanical properties of polymers*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 449 p. (in Russian).
4. Vershina G. A., Pilatov A. Yu. *Way of manufacturing of a cutting ring from a polymeric material and the device for its realisation*. Patent Republic of Belarus BY no. 14191. Publ. date 30.04.2011 (in Russian).
5. Vershina G. A., Pilatov A. Yu. *Way of manufacturing of cutting protective rings from a polymeric material*. Patent Republic of Belarus no. 19073. Publ. date 30.04.2015 (in Russian).
6. Vershina G. A., Reut L. E. The analysis of deformation behaviour of fluoroplastic-4 in the conditions of power influence. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2016, no. 4, pp. 23–30 (in Russian).
7. Knunyants I. L. (ed.). *Short chemical encyclopedia. Volume 3*. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1964. 560 p. (in Russian).
8. Tugov I. I., Kostrykina G. I. *Chemistry and physics of polymers*. Moscow, Himiya Publ., 2009. 432 p. (in Russian).
9. Ciklis D. S. *Technique of physical and chemical researches with high and ultrahigh pressures*. Moscow, Himiya Publ., 1965. 416 p. (in Russian).
10. Gul' V. E., Kuleznev V. N. *Structure and mechanical properties of polymers*. Moscow, Labirint Publ., 1994. 370 p. (in Russian).
11. Timoshenko S. P., Guder D. *Theory of elasticity*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 566 p. (in Russian).
12. Birger I. A., Mavlyutov R. R. *Resistance of materials*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 560 p. (in Russian).
13. Feodos'ev V. I. *Resistance of materials*. Moscow, Nauka Publ., 1967. 550 p. (in Russian).
14. Samul V. I. *Bases of the theory of elasticity and plasticity*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970. 288 p. (in Russian).
15. Storozhev M. V., Popov E. A. *The theory of processing of metals pressure*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 423 p. (in Russian).

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

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

Reut Larisa Efimovna – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Resistance of Materials of a Machine-Building Profile, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sopromat_reut@mail.ru

Для цитирования

Вершина, Г. А. Упругопластический изгиб фторопластовой ленты при сворачивании в кольцо / Г. А. Вершина, Л. Е. Реут // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 40–48.

For citation

Vershina G. A., Reut L. E. Elasto-plastic bending of a fluoroplastic tape at bending in a ring. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technychnych navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 2, pp. 40–48 (in Russian).