

УДК 678.017; 691.175

ВЫБОР ДОПУСКАЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ НА ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПЛАСТМАСС

Кузьмин А.А., Яблокова М.А.

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)», Санкт-Петербург, e-mail: kip@technolog.edu.ru

Выбор допускаемых напряжений для прочностного расчета изделий из пластмасс менее однозначен, чем для металлов. В настоящей работе предлагается совместить классический подход и учет специфики полимерных материалов, а именно ограничить допускаемое напряжение $[\sigma]$ значением, при котором материал работает в области обратимых деформаций. Для металлов это предел упругости, а для пластмасс – максимальное напряжение, при котором образец восстанавливает свои размеры после снятия нагрузки. При этом длительность опытов должна быть адекватна условиям эксплуатации. В работе предлагается ограничить допускаемое напряжение для деталей из пластмасс величиной, аналогичной пределу упругости для металлов. Эксперименты, проведенные на образцах из фторопласта и капролона, позволили предложить методику определения допускаемых напряжений и ограничить их половиной предела текучести. Предложен график обслуживания длительно эксплуатируемых деталей из пластмасс.

Ключевые слова: изделия из пластмасс, допускаемое напряжение, предел текучести, коэффициент запаса, ползучесть

THE SELECTION OF THE ALLOWABLE STRESS WHEN CALCULATING THE STRENGTH OF PLASTIC PARTS

Kuzmin A.A., Yablokova M.A.

Federal State Educational Institution of Higher Education St. Petersburg State Institute
of Technology (Technical University), St. Petersburg, e-mail: kip@technolog.edu.ru

Choosing permissible stresses for strength calculation of plastic products is less clear than for metals. In this paper we propose to combine the classical approach and taking into account specifics of polymeric materials, namely to limit the allowable stress $[\sigma]$ by the value at which the material operates in the field of reversible deformation. For metals this is the elastic limit, and plastic – maximum stress at which the sample recovers its size after removing the load. The duration of the experiments should be adequate to the operating conditions. The paper proposes to limit the allowable stress value similar to the limit of elasticity for metals. The experiments, conducted on the samples of fluoroplastic (PTFE) and kaprolon, allowed us to propose a method of determining the permissible stress and limit them to half the yield stress. The service schedule of long operated plastic parts is proposed.

Keywords: plastic parts, allowable stress, yield strength, factor of safety, creep

Пластмассы давно нашли широкое применение в строительстве, машиностроении, энергетике, электронике, медицине и других областях производственной деятельности человека. Во многих конструкциях детали из пластмасс испытывают значительные силовые нагрузки, например: трубы, сосуды, зубчатые передачи, уплотнительные узлы, эндопротезы и т.д. В таких случаях необходимо проведение прочностных расчетов, что невозможно без обоснованного выбора допускаемых напряжений $[\sigma]$. Для металлов за $[\sigma]$, как правило, принимают частное от деления предельного или опасного напряжения σ на коэффициент запаса S [1]. В качестве предельного обычно принимают предел текучести σ_y , прочности σ_b или выносливости σ_{-1} . При этом коэффициенты запаса S могут определяться сложным путем и зависеть от многих факторов [2]. Однако ограничением при выборе S всегда является условие

$$[\sigma] \leq \sigma_y,$$

где σ_y – предел упругости, то есть материал должен работать в упругой области и восстанавливать свои размеры после снятия

нагрузки [1]. Это справедливо для зубчатых передач, уплотнительных узлов, эндопротезов, строительных конструкций и множества других случаев. При расчете изделий из пластмасс необходимо учитывать их вязкоупругие свойства, что проявляется в растянутости механических процессов во времени [3]. Особенно это характерно для наиболее широко применяемых полимеров: полиолефинов, фторопластов, полиамидов.

Современными исследованиями [4, 5] установлена надежная корреляция между характером разрушения, действующими нагрузками, видом напряженно-деформированного состояния и результатами испытаний при одноосном растяжении. Колбая [5] показана значимость предела текучести как базовой для прочностных расчетов величины. Анализируя процессы текучести, некоторые авторы [6] предлагают считать полимерные материалы практически несжимаемыми и определять связь предела текучести и модуля упругости по формуле

$$\sigma_y / E = (1 - 2M) / [6(1 + M)],$$

где M – коэффициент Пуассона, составляющий для перечисленных материалов пример-

но 0,4. По мнению Дибировой [6], это способствует анализу результатов испытаний, проведенных в различных условиях. Ряд авторов [7] рекомендует отталкиваться от предела текучести и использовать понятие дифференциального коэффициента запаса:

$$N = S \cdot K \cdot T \cdot M,$$

где $S = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot S_4$; $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$; $T = T_1 \cdot T_2$; $M = M_1 \cdot M_2$.

Коэффициенты S, K, T, M компенсируют неполноту знания и учитывают условия эксплуатации, особенности материала, вид нагрузки, технологию изготовления и другие факторы.

Таким образом, значительная часть современных авторов в качестве допускаемых напряжений рекомендует выбирать предел текучести, деленный на коэффициент запаса. Однако достаточно давно расчеты изделий из пластмасс на прочность проводятся с учетом вязкоупругих свойств полимеров [3], и для таких расчетов необходимы более глубокие исследования.

Особая необходимость в более глубоких исследованиях возникает при расчете изделий из пластмасс, претерпевающих структурные изменения, воздействие тепловых и динамических нагрузок, имеющих длительный период эксплуатации. Так широко применяемая контактно-тепловая сварка изменяет структуру полимеров и вызывает остаточные напряжения. Например, при сварке трубопроводов образуется сварочный грат, являющийся концентратором напряжений [8]. Неравномерность распределения напряжений по всей поверхности адгезионного соединения также требует внимания. Однако в [9] показана корректность усреднения напряжений по всей площади контакта, и в качестве критерия разрушения адгезионного соединения полимер-полимер предлагается использовать максимальные касательные напряжения при сдвиге.

При всех достоинствах сварных и клеевых соединений они являются неразъемными, поэтому наряду с фланцами широкое распространение получили компрессионные фитинги. И фланцы, и фитинги удобны в эксплуатации, обеспечивают герметичность, удобны при монтаже, однако, как и запорно-регулирующая арматура, требуют при проектировании и эксплуатации учета релаксации удельных давлений. В [10] предложена методика расчета релаксации удельных давлений. Там же показана эффективность применения сшитого полиэтилена и высокое постоянство его квазиравновесного релаксационного модуля. Однако вопрос выбора предельных напряжений для прочностного расчета остается открытым.

В [11] при определении предельных деформаций предложено учитывать влияние последствий, что существенно уточняет прогнозирование разрушения, но длительность испытаний ограничивается пятью минутами, что не вполне соответствует длительности эксплуатации целого ряда изделий из пластмасс.

По длительности эксплуатации изделия из пластмасс условно можно разделить на три группы:

1. Изделия, испытывающие кратковременные нагрузки. Это зубчатые колеса, зубья которых испытывают нагрузку только в зацеплении, тормозные колодки и т.п. детали.

2. Изделия, испытывающие периодическую нагрузку. Это детали запорно-регулирующей арматуры, периодически меняющие свое положение, вкладыши подшипников, периодичность работы которых определяется режимом работы агрегата и др.

3. Изделия, испытывающие длительную постоянную нагрузку. Это уплотнители фланцевых соединений, компрессионные фитинги, элементы строительных конструкций, детали трубопроводов.

Таким образом, выбор допускаемых напряжений для изделий из пластмасс, который обеспечивал бы их работоспособность, учитывал бы режимы эксплуатации и специфические свойства, представляется актуальной задачей.

В настоящей работе предлагается совместить классический подход и учет специфики полимерных материалов, а именно ограничить допускаемое напряжение $[\sigma]$ значением, при котором материал работает в области обратимых деформаций. Для металлов это уже упоминавшийся предел упругости, а для пластмасс – максимальное напряжение, при котором образец восстанавливает свои размеры после снятия нагрузки. При этом длительность опытов должна быть адекватна условиям эксплуатации. Например, зуб гибкого колеса волновой передачи должен восстанавливать свою геометрию к следующему вхождению в зацепление, уплотнитель шарового крана должен восстанавливать размер после каждого поворота пробки [12].

В отличие от запорно-регулирующей арматуры фланцевые соединения, фитинги, строительные конструкции не испытывают периодического воздействия, а эксплуатируются в условиях постоянного нагружения. В этом случае монтажные напряжения не должны превышать некоторых допускаемых значений $[\sigma]$, и одновременно в проектируемой конструкции должны поддерживаться напряжения, обеспечивающие ее работоспособность.

С учетом вышеизложенного были проведены опыты по исследованию прямой и обратной ползучести фторопласта-4 и капролона как одних из наиболее известных и применяемых полимерных материалов. Опыты проводили при ступенях нагружения, составляющих 1 МПа для фторопласта и 10 МПа для капролона. Длительность прямого и обратного хода составляла 60 мин. Шаг нагружения выбирался на основе предварительно определенных пределов текучести $\sigma_T = 12$ МПа для фторопласта и $\sigma_T = 100$ МПа для капролона. Из анализа кривых ползучести (рис. 1) видно, что при напряжениях более 7–8 МПа для фторопласта и более 60 МПа для капролона материалы не восстанавливают свои раз-

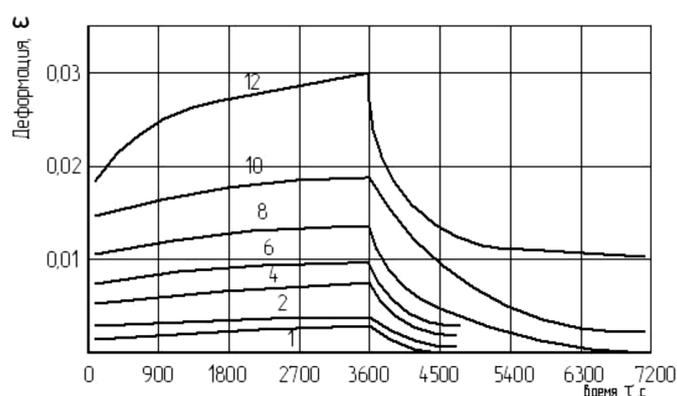
меры, т.е. попадают в область необратимых деформаций и, следовательно, переходят из одного состояния в другое. Эти напряжения и следует принять как предельные. В таком случае необходим ясный критерий их определения. Таковым представляется степень восстанавливаемости K [13], определяемая по формуле

$$K = \varepsilon_y(2\tau_0) / \varepsilon(\tau_0),$$

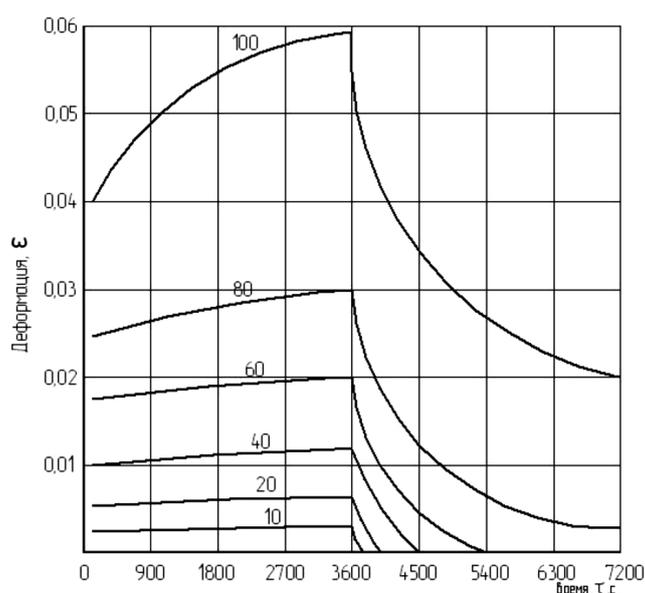
где $\varepsilon_y(2\tau_0)$ – упругая (обратимая) часть деформации;

$\varepsilon(\tau_0)$ – деформация ползучести в момент снятия нагрузки;

$\tau_0 = 3600$ с – время прямого и обратного хода.



а)



б)

Рис. 1. Кривые прямой и обратной ползучести при различных уровнях напряжения (численные значения у кривых): а) фторопласт-4; б) капролон

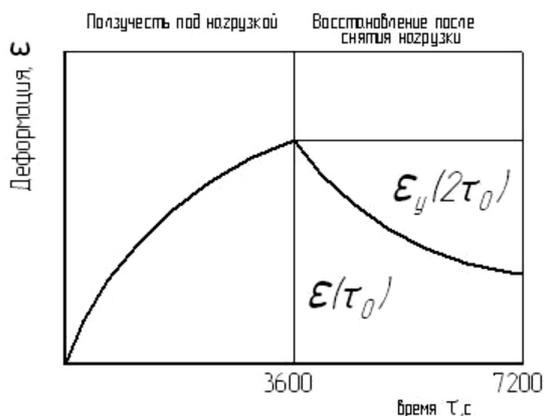


Рис. 2. Схема к графическому определению степени восстанавливаемости

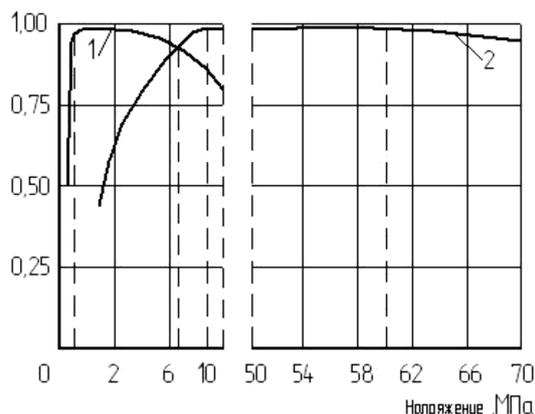


Рис. 3. Зависимость степени восстанавливаемости от напряжения: 1 – фторопласт-4; 2 – капролон

Графическая иллюстрация предложенного подхода приведена на рис. 2 и 3, откуда следует, что при напряжениях выше $0,5\sigma_T$ оба материала не восстанавливают свои размеры. Видимо, напряжения, при которых в процессе обратной ползучести образец из полимера не восстанавливает свои первоначальные размеры, следует считать аналогом предела упругости.

В качестве окончательной рекомендации предельным напряжением следует считать предел текучести σ_T , а при отсутствии каких-либо дополнительных факторов коэффициент запаса S принимать равным 2. В таком случае допускаемое напряжение должно удовлетворять условию

$$[\sigma] \leq 0,5\sigma_T$$

При напряжениях $\sigma \leq 0,1\sigma_T$ (рис. 2, 3) неполная восстанавливаемость обусловлена обмятием микро- и макронеровностей на поверхности испытываемых образцов, а также зазорами испытательной машины. Целесообразность применения материала при напряжениях $\sigma \leq 0,1\sigma_T$ следует определять на основе анализа условий эксплуатации. Например, в зубчатых передачах, вкладышах подшипников скольжения это не играет существенной роли. Материал приработается, и определять работоспособность будут триболометрические свойства. В уплотнениях избыточные усилия на обмятие поверхности могут привести к росту габаритов. Таким образом, окончательное решение о применимости материала остается за разработчиком.

Для изделий из пластмасс, работающих непрерывно годы и месяцы, необходим еще график технического обслуживания, учитывающий их свойства. Например, для

шарового крана Ду 100 расчетным путем с использованием напряженно-временной аналогии была получена кривая релаксации удельных давлений q (рис. 4, кривая 1).

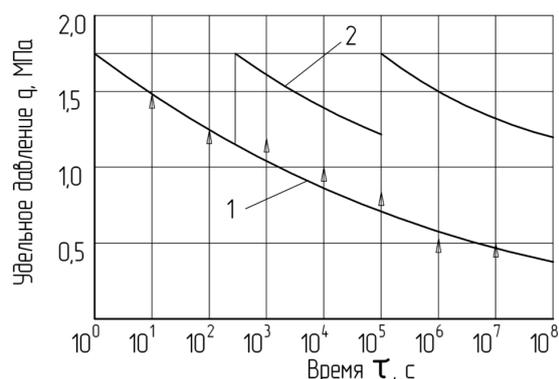


Рис. 4. Кривые релаксации удельных давлений уплотнителя из фторопласта-4: 1 – без ступенчатого сближения фланцев; 2 – со ступенчатым сближением фланцев

При этом если первоначальное удельное давление при сближении фланцев на 0,01 мм составляет 1,75 МПа, то через 108 секунд эта величина снижается до 0,43 МПа. Так как при расчетах удельных давлений величина q прямо пропорциональна произведению квазиравновесного релаксационного модуля E и величины сближения фланцев b , для сохранения постоянной величины удельного давления необходимо, чтобы в каждый момент времени соблюдалось условие $E \cdot b = \text{const}$. Имея зависимость релаксационного модуля от времени можно рассчитать величину дополнительного сближения в каждый момент времени. Если

предусмотреть два промежуточных сближения, можно при тех же начальных удельных давлениях повысить величину конечного более чем в два раза (рис. 4, кривая 2).

Контрольный эксперимент проводили с использованием стандартного шарового крана Ду 100 в течение одних суток. Полученные расчетным путем величины осевых усилий и перемещений отличались от экспериментальных несущественно.

Заключение

При расчете изделий из пластмасс допускаемое напряжение не должно превышать половину предела текучести. График технического обслуживания необходимо составлять с учетом релаксационных процессов, при этом следует предусматривать постепенное нагружение пластмассовых изделий.

Список литературы

1. Беляев Н.М. Соппротивление материалов. – М.: Наука, 1965. – 856 с.
2. Иванов М.Н., Финогонов В.А. Детали машин: учебник для машиностроительных специальностей вузов. – 12-е изд. испр. – М.: Высшая школа, 2008. – 408 с.
3. Миненков Б.В., Стасенко И.В. Прочность деталей из пластмасс. – М.: Машиностроение, 1977. – 264 с.

4. Колбая В.Г., Солдатенко Л.И., Коврига В.В. Анализ зоны пластического разрушения полимерных труб // Пластические массы. – 2014. – № 11–12. – С. 38–40.

5. Колбая В.Г., Сеньковский А.Н., Тришина Е.А. Об аналогии в виде кривой нарастания давления при гидравлическом нагружении полиэтиленовых труб и кривой растяжения // Пластические массы. – 2015. – № 1–2. – С. 31–34.

6. Дибирова К.С., Козлов Г.В., Магомедов Г.М. Теоретический анализ процесса текучести нанокомпозитов // Пластические массы. – 2014. – № 3–4. – С. 24–25.

7. Производство изделий из полимерных материалов: учебное пособие / В.К. Крыжановский [и др.]. – СПб.: Профессия, 2004. – 464 с.

8. Аристов В.М., Аристова Е.П. Модель напряженного состояния в сварных полимерных трубопроводах // Пластические массы. – 2013. – № 6. – С. 26–28.

9. Бойко Ю.М. К вопросу об определении прочности при сдвиге гомо-адгезионных соединений полимер-полимер // Пластические массы. – 2012. – № 6. – С. 36–40.

10. Шаляпин С.В., Гвоздев И.В., Симонов И.Д. Изучение процессов релаксации напряжения в шитом полиэтилене // Пластические массы. – 2012. – № 12. – С. 19–23.

11. Струкова А.В., Елисеев В.В. Учет размерного последствия при построении экспериментальных диаграмм разрушения термопластов // Пластические массы. – 2012. – № 5. – С. 42–46.

12. Гольдман А.Я. Экспресс-метод оценки герметизирующей способности полимерных уплотнительных элементов // Пластические массы. – 1986. – № 7. – С. 38–39.

13. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. – М.: Химия, 1978. – 312 с.