

УДК 621.431

А.В. Неменко, канд. техн. наук, доцент*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua***ОЦЕНКА ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ КАПРОЛОНА ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ СУДОВЫХ МЕХАНИЗМОВ**

Приведены результаты исследования модельных образцов из полимерного материала типа капролон «В» при циклическом знакопеременном изгибе, полученные на специальном исследовательском комплексе. Произведена оценка прочностной надежности изделий из капролона: в состоянии поставки материала; после термообработки в масляной ванне; после максимального насыщения влагой.

Ключевые слова: капролон, циклические нагрузки, усталость, предел выносливости, термообработка, влагонасыщение.

Введение. Безотказная эксплуатация механических систем производственных агрегатов находится в зависимости от множества факторов. Базовые показатели регламентов работоспособности зависят от структурных особенностей объекта, свойств материала, из которого он изготовлен, среды использования и характеристик нагружающего воздействия. Эта совокупность свойств определяет степень эксплуатационной пригодности изделия.

Показатели состояния объекта представляют собой совокупность данных, полученных расчетным и экспериментальным путем при согласовании с техническими нормативами.

Прогнозирование вероятности безотказной работы объекта построено на оптимальной оценке показателей, создающих информационный портрет. Прогноз становится более прозрачным при условии выделения критичного элемента и установления в нем опасных зон. В базу регламентирующих данных закладываются как параметрические модели, так и цензурированные. В случае применения параметрических методов оценки предполагается известный тип распределения наработки до отказа. По цензурированным выборкам целесообразно применение метода обратных рангов оценки показателей надежности, при котором наработки до отказа выстраиваются в вариационный ряд в порядке возрастания. В случае, когда вид закона распределения наработки установить затруднительно, применяется непараметрический метод обратных рангов. Если вариационный ряд заканчивается наработками до цензурирования, производится проверка качества прогноза.

Производственная надежность механических систем определяется рядом факторов, одним из которых является прочностная надежность. Прочностная надежность – категория показателей состояния детали, отражающая способность изделия к работе без повреждений и отказов по причине недостаточной прочности.

Существенное влияние на показатели прочностной надежности оказывают циклические нагрузки с переменной величиной нагружающих воздействий, которые вызывают необратимые изменения в материале изделия и приводят к внезапным отказам вследствие усталостного повреждения. В таких случаях циклическая прочность является определяющим критерием для безопасной эксплуатации производственных объектов, а предел выносливости важная механическая характеристика.

В ряде случаев в качестве материала при изготовлении элементов судовых механизмов применяется капролон. К достоинствам капролона относится антикоррозионная стойкость, что позволяет применять его в морской среде, высокая износостойкость, вибростойкость, достаточная пластичность при приработке, высокие антифрикционные свойства. Капролон легче бронзы и стали, взамен которых он часто устанавливается.

Фундаментальные исследования полимерных материалов, проведенные А.А. Илюшиным, Н.И. Малининым, Ю.С. Работновым и рядом других авторов [1, 2] показали возможность применения этих материалов в качестве конструкционных.

Однако, изложенные в открытой печати рекомендации по использованию капролона в качестве материала для элементов судовых механизмов недостаточно информативны, поэтому в каждом конкретном случае требуется индивидуальная оценка его применения.

Исследования циклической прочности полимерных материалов, в том числе капролона, как правило, проводят по методике исследования на усталость, которая разработана для металлических материалов. Результаты таких испытаний недостаточно точны и требуют дополнительных исследований по специальным методикам, где учтены реальные параметры конструкции и условия эксплуатации.

Цель исследования состоит в оценке циклической прочности элементов из «капролона В», работающих в режиме знакопеременного изгиба в условиях морской среды.

Решение поставленной задачи было осуществлено на разработанном исследовательском комплексе, состоящем из ряда функциональных модулей: модуль подготовки, в рамках которого оценивается критичность элементов по моделям формы, нагружения, разрушения и материала и намечается стратегия решения задачи; рабочий модуль и производится исследование объекта по программе, намеченной в модуле подготовки; аналитический модуль, где производится оценка данных, полученных в рабочем модуле; управляющий модуль, где принимаются решения по функционированию системы в целом.

В рабочем модуле использована специально разработанная экспериментальная установка (рисунок 1), устройство которой позволяло моделировать нагружающее воздействие в исследуемых элементах. Выбор принципиальной схемы машины для усталостных испытаний обуславливается характером деформации реальных деталей, подлежащих исследованию. При разработке ее конструкции за основу была принята динамическая система с жестким силовозбуждением [3, 4]. Эта схема характеризуется тем, что исходной величиной является возбуждаемое динамическое перемещение с кинематически фиксированной амплитудой, величина которой не зависит от частоты возбуждения.

От электродвигателя крутящий момент передается на диски с эксцентриковыми шайбами 1 с пальцами. С пальцев через шатуны и нижние захваты 2 усилия передаются на два консольных образца 3.

Образцы закреплены широким концом в неподвижных верхних захватах. Узкие концы образцов закреплены в нижних захватах, которые перемещаются с заданной циклическостью и установленной величиной амплитуды. Одновременно испытывались два образца. Изменение величины максимальных деформаций образцов осуществляется поворотом эксцентриковых шайб 1 независимо в каждой позиции. С целью получения более благоприятного распределения нагрузок в узлах испытательной машины, эксцентриковые шайбы устанавливаются так, чтобы деформации и напряжения образцов находились в противофазе. В соответствии с конструкцией испытательной машины плечо изгибающего момента, действующего на образец, зависит от длины образца. Величины отклонения перемещающихся концов образцов от центрального положения определяются при помощи специального приспособления, устанавливаемого при настройке машины.

Учет циклов ведется специальным устройством, которое фиксирует также поломку образца.

Испытанию знакопеременным симметричным изгибом подвергались образцы в виде балки треугольного сечения, равного сопротивления изгибу с постоянной высотой сечения. Такая балка имеет одинаковые напряжения по всей длине, и разрушение в любом сечении по длине балки с достаточно высокой степенью достоверности равновероятно. На расстоянии 120 мм от узкого конца образца располагались или переход от тела образца к головке, или концентраторы напряжений. В качестве «гладкого образца» был принят образец с большим радиусом галтели. В качестве концентраторов напряжений принята галтель малого радиуса и две канавки полукруглого сечения.

Чистота поверхности в зоне галтели и концентраторов напряжений соответствовала чистоте поверхности $R_z 40$. Размеры поперечных сечений и длина образцов контролировались с точностью до 0,01 мм. Напряжение изгиба σ_F , возникающее в образце под действием изгибающего момента M_n и вызывающего прогиб консольного образца на плече l при толщине образца δ и модуле упругости при изгибе E_n равно $\sigma_F = 3E_n \cdot \delta \cdot f / 2l^2$.

При установленном модуле упругости $E_n = (1980 \dots 2020)$ МПа, при толщине образца $\delta = 10$ мм на плече равном 100 мм напряжения изгиба σ_F связаны с величиной прогиба при консольном изгибе соотношением $\sigma_F = (2,97 \dots 3,03) \cdot f$, что используется при оценке напряженно-деформированного состояния исследуемого образца и настройки испытательного комплекса. Предел выносливости σ_{-1} при симметричном знакопеременном изгибе капролона, у которого предел прочности $\sigma_F = 80$ МПа (ТУ-6-06-142-90), первый уровень нагружения при построении кривой усталости осуществляется с напряжением $\sigma_{F1} = 0,75 \cdot \sigma_F$, т.е. $\sigma_{F1} = 60$ МПа. На последующих уровнях напряжение уменьшалось на 3...6 МПа.

На каждом уровне испытывались 3 - 4, а на пределе выносливости испытывались 4 - 5 образцов.

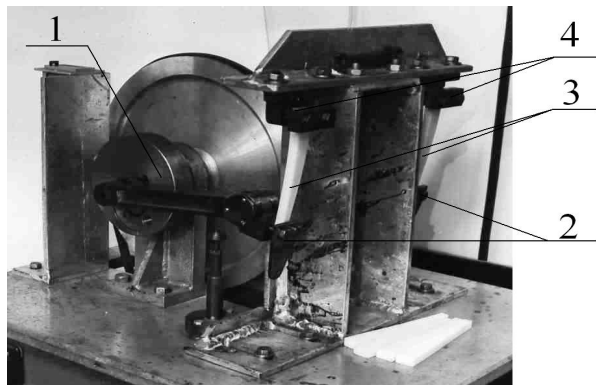


Рисунок 1 – Общий вид экспериментальной установка для испытаний консольных образцов симметричным знакопеременным циклическим изгибом:

- 1 – эксцентриковые шайбы; 2 – нижние захваты;
3 – испытываемые образцы; 4 – верхние захваты

Минимально необходимое количество образцов для испытаний по определению предела выносливости устанавливалось согласно рекомендациям [5] $n \geq 1,5 + (Z_{1-\alpha/2}^2 / 2\Delta_\sigma^2)$. В случае относительной максимальной ошибки $\Delta_\sigma = 0,25$; квантиле $Z_{0,95} = 1,64$, соответствующем доверительной вероятности $P = 0,9$, для вероятности ошибки $\alpha = 0,1$, общее количество образцов $n \geq 1,5 + (1,64^2 / 2 \cdot 0,025^2) \geq 22$.

База испытаний была установлена равной 1 млн. циклов.

В процессе усталостных испытаний устанавливалась связь между амплитудой напряжения и долговечностью образца. Первая величина была независимой и ее значениями задавались при планировании испытаний. Вторая величина – случайная, подчиняющаяся логарифмическому нормальному закону распределения. Для установления количественной связи между напряжением и долговечностью использован линейный регрессионный анализ. Величины, между которыми устанавливается связь, преобразуются так, чтобы уравнение кривой усталости было представлено как линейное соотношение между напряжением и долговечностью.

Результаты испытаний на циклическую прочность (рисунки 2, 3, 4, 5) представлены в системе координат: ось ординат – напряжение; ось абсцисс – логарифм долговечности (число циклов до разрушения).

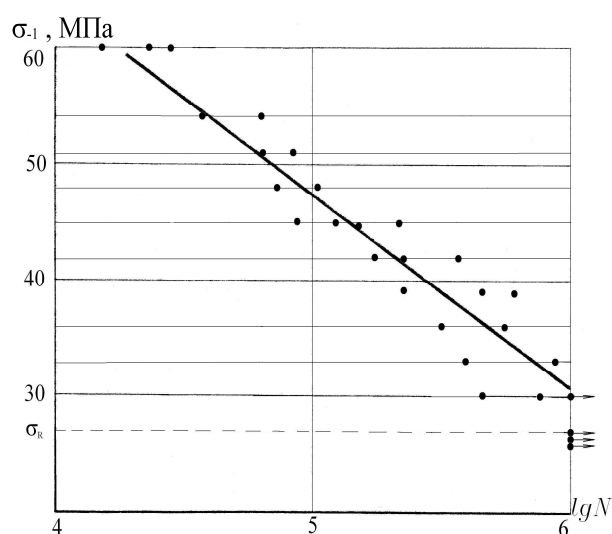


Рисунок 2 – Результаты испытаний на циклическую прочность образцов с радиусом галтели 10 мм

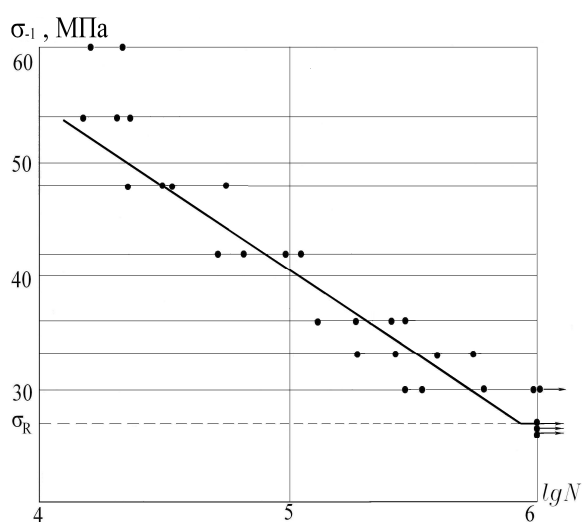


Рисунок 3 – Результаты испытаний на циклическую прочность образцов с канавкой радиуса 1 мм

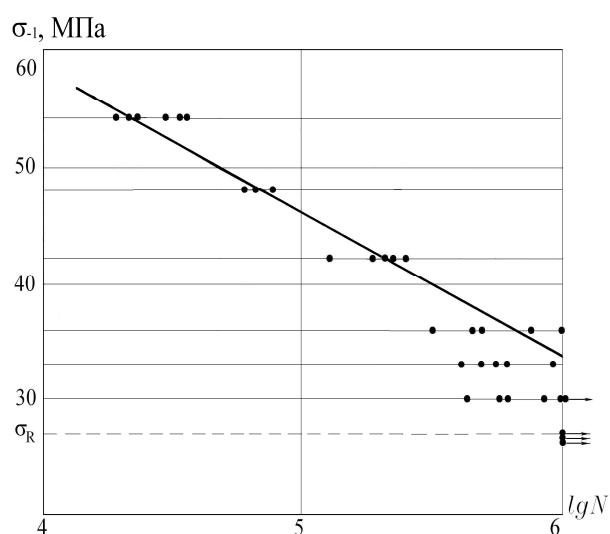


Рисунок 4 – Результаты испытаний на циклическую прочность образцов с радиусом галтели 0,8 мм

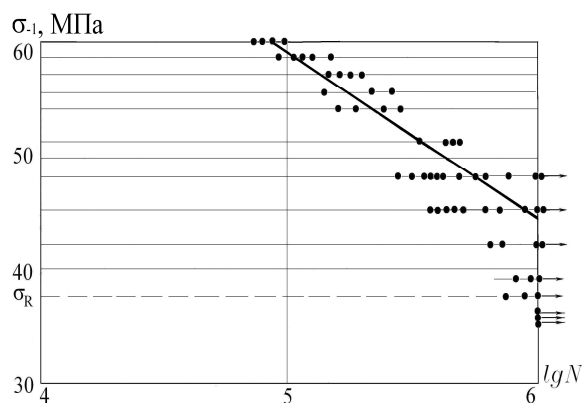


Рисунок 5 – Результаты испытаний на циклическую прочность образцов с радиусом галтели 0,8 мм (образцы подвергнуты термообработке)

Термическая обработка капролона была произведена путем нагрева в масляной ванне до 100 °С, выдержкой в течение трех часов при этой температуре и медленным охлаждением. Термообработке подвергались образцы с радиусом галтели 0,8 мм. В результате испытаний 58 термообработанных образцов было установлено значение предела выносливости $\sigma_{-1} = 36$ МПа.

Термическая обработка капролона дает определенный положительный эффект, что видно при сравнительном анализе рисунков 4 и 5. Влияние влагосодержания на циклическую прочность «капролона В» оценивалось испытаниям модельных образцов материала в морскую воду на 150 дней.

Эта партия образцов была в свою очередь испытана на усталостной машине. Предел выносливости оказался равным $\sigma_{-1} = 14$ МПа. Итоговые данные экспериментальных исследований на циклическую прочность представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний на циклическую прочность

№ серии	Характеристика образцов в сериях	Влагосодержание, %	Предел выносливости, МПа	Число образцов
1	С большой галтелью (радиус 10 мм)	<0,2	27	31
2	С малой галтелью (радиус 0,8 мм)	<0,2	27	37
3	С канавками (радиус 1 мм)	<0,2	27	36
4	Термически обработанные с малой галтелью (радиус 0,8 мм)	<0,2	36	59
5	Выдержанные в морской воде с малой галтелью (радиус 0,8 мм)	6,0	14	12

Показатель прочностной надежности, являющиеся основой безопасной эксплуатации судовых механизмов, учитывает влияние различных нештатных ситуаций, количественная оценка которых отражена коэффициентами запаса прочности. При этом устанавливается величина допускаемых напряжений в конструкциях. Оценка циклической прочности конструкции при знакопеременном симметричном изгибе при установленном пределе выносливости σ_{-1} и запасе прочности S производится по допускаемым напряжениям $\sigma_{\text{ФР}} = \sigma_{-1}/S$.

Запас прочности устанавливается дифференциальным методом, скорректированным применительно к пластмассам. Надежность материала учитывает коэффициент S_1 , который для капролона, полученного путем блочной полимеризации равен 1,3. Степень ответственности детали учитывает коэффициент S_2 , который равен 1,2, если поломка детали вызывает остановку машины, и $S_2 = 1,3$, если поломка детали вызывает аварию. Точность расчета и учета действующих сил учитывает коэффициент K , который равен 1 при высокой точности; $K = 1,25$, если используется приближенная зависимость и неполный учет действующих сил. Коэффициент M учитывает достоверность анализа первичного материала ($M = 1,1$, если проба берется из каждого блока, $M = 1,5$, если проба берется не из каждого блока). Общий коэффициент запаса прочности равен $S = S_1 \cdot S_2 \cdot K \cdot M$.

Для случая, когда поломка детали вызывает остановку машины, при высокой точности расчетных формул, полном учете действующих сил и испытанию образцов из каждого поставленного блока материала запас прочности $S_{\text{min}} = 1,7$. В случае, когда поломка детали вызывает аварию машины, при использовании приближенных расчетных формул, неполном учете действующих сил и отсутствии испытания образцов из каждого поставленного блока материала запас прочности $S_{\text{min}} = 3,2$.

Принимая эти значения запаса прочности за исходные, предполагая высокую степень ответственности детали, получают следующие значения допускаемых напряжений для деталей из капролона, работающих при переменных нагрузках: для деталей из капролона в состоянии поставки $\sigma_{\text{ФР}} = 27/3,2 = 8,5$ МПа; для деталей из термически обработанного капролона $\sigma_{\text{ФР}} = 36/3,2 = 11$ МПа; для деталей из капролона, выдержанных в морской воде $\sigma_{\text{ФР}} = 14/3,2 = 4,5$ МПа;

Эти величины допускаемых напряжений справедливы для капролоновых деталей, работающих при температуре $t = 20 \pm 2$ °С и частоте переменных напряжений $f \leq 0,8$ Гц.

Фрактографические исследования разрушенных образцов показал, что в плоскости излома (рисунки 6, 7, 8, 9) можно выделить две зоны: зоны возникновения и распространения усталостных трещин – белого цвета; зоны статического долома – желтоватого цвета.

Осветление усталостных зон объясняется, очевидно, тем, что усталостная трещина распространяется по межкристаллическим границам и промежуткам между аморфными частицами. Процесс развития трещины длительный и имеет место истирание поверхности трещины и ее осветление.

В результате проведенных испытаний модельных образцов из полимерного материала типа капролон «В» при знакопеременном изгибе были получены результаты, показывающие возможность его использования в качестве конструкционного материала в судостроении.

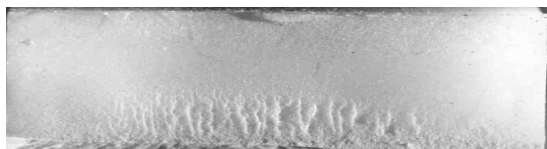


Рисунок 6 – Излом образца с радиусом галтели 10 мм ($\sigma = 42$ МПа, $N = 226\,300$ циклов)

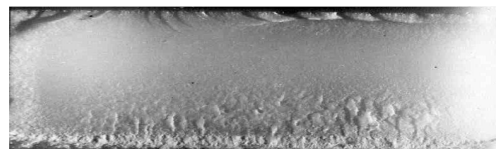


Рисунок 7 – Излом образца с радиусом галтели 0,8 мм ($\sigma = 54$ МПа, $N = 114\,000$ циклов)

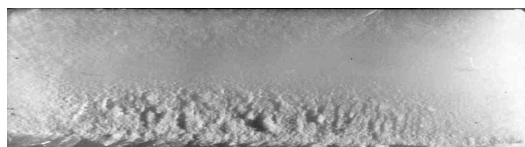


Рисунок 8 – Излом образца с радиусом галтели 0,8 мм (образец подвергнут термообработке), ($\sigma = 60$ МПа, $N = 92\,500$ циклов)

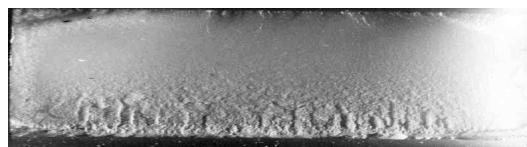


Рисунок 9 – Излом образца с радиусом галтели 0,8 мм (образец подвергнут процессу влагонасыщения), ($\sigma = 30$ МПа, $N = 72\,500$ циклов)

Выводы

1. Испытания на циклическую прочность при знакопеременном изгибе образцов из полимерного материала типа «капролон В» в состоянии поставки был установлен предел выносливости σ_{-1} , который равен 27 МПа.
2. Исследуемый материал при знакопеременном изгибе нечувствителен к таким концентраторам напряжений как галтель малого радиуса равного 0,8 мм и полукруглая канавка радиусом 1 мм (рисунки 3, 4).
3. Термическая обработка при температуре до 100 °С в масляной ванне увеличивает циклическую прочность – предел выносливости увеличился на 33 %, $\sigma_{-1} = 36$ МПа.
4. Увеличение влагосодержания до предельного насыщения материала образца приводит к уменьшению циклической прочности – предел выносливости уменьшается фактически вдвое, $\sigma_{-1} = 14$ МПа.
5. Дифференциальный метод определения запаса прочности, будучи использован для расчета деталей из капролона, позволяет учесть ряд факторов, специфичных для этого материала и существенно влияющих на его прочность при переменных напряжениях.
6. Данные, полученные при исследовании, могут быть использованы для экспертных оценок элементов судовых механизмов.

Библиографический список использованной литературы

1. Бахарева В.К. Полимеры в судовом машиностроении / В.К. Бахарева, И.А. Конторовская, Л.В. Петрова. — Л.: Судостроение, 1975. — 237 с.
2. Миненков Б.В. Прочность деталей из пластмасс / Б.В. Миненков, И.В. Стасенко. — М.: Машиностроение, 1977. — 264 с.
3. Серенсен С.В. Динамика машин для испытаний на усталость / С.В. Серенсен, И.Э. Гарф, В.А. Кузьменко. — М.: Машиностроение, 1967. — 460 с.
4. Школьник Л.М. Методика усталостных испытаний. Справочник / Л.М. Школьник. — М.: Металлургия, 1978. — 301 с.
5. ГОСТ 25.502-79. Методы испытаний на усталость. Введ. 1.07.1986. Дата актуализации 15.01.2008. — М.: Изд-во стандартов, 2007. — 50 с.

Поступила в редакцию 29.06.2011 г.

Неменко О.В. Оцінка циклічної міцності капролону для елементів судових механізмів

Приведені результати дослідження модельних зразків з полімерного матеріалу типу капролон «В» при циклічному знакозмінному згинанні, які отримані на спеціальному дослідницькому комплексі. Проведена оцінка міцнісної надійності виробів з капролону: у стані постачання матеріалу; після термообробки у масляній ванні; після максимального насичення вологою.

Ключові слова: капролон, циклічні навантаження, втома, межа витривалості, термообробка, вологонасичення.

Nemenko A.V. Estimation of cyclic stability of kaprolon for elements of ship mechanisms

In the article is presented the results of testing of products made of polymeric Kaprolon' material. The testing included cyclical symmetric bending, carried out with the help of special scientific testing equipment. The reliability of stability were established in different conditions: a raw material, after being treatment by heat in oil-bath, after absorbing maximum amount of water.

Keywords: kaprolon, cyclic loadings, fatigue, limit of endurance, heat treatment, satiation moisture.