

А. А. Тройников, А. Д. Пичугин

ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МАТЕРИАЛА МР

Материал МР представляет собой пористую металлическую структуру, получаемую путем холодного прессования из проволоочной спирали в окончательные по форме и размерам детали [1].

Созданный для замены резины в амортизирующих и демпфирующих устройствах МР обладает рядом преимуществ по сравнению с эластомерами. Основными отличительными особенностями МР являются: высокая статическая и динамическая прочность, демпфирующая способность, стойкость к воздействию агрессивных сред, способность работать в условиях высоких и низких температур, глубокого вакуума, практически неограниченный срок хранения. Обладая комплексом положительных качеств, материал МР успешно применяется для снижения вибрационной напряженности элементов, узлов и систем двигателей летательных аппаратов.

Механические свойства материала МР во многом определяются способом его изготовления, а также технологическими параметрами упруго-демпфирующих элементов (УДЭ), главными из которых являются: ρ_c — плотность материала; ρ_3 — плотность заготовки УДЭ, ρ_n — плотность материала проволоки; d — диаметр спирали; δ — диаметр проволоки; E_n — модуль упругости проволоки; $\sigma_{тн}$ — предел текучести проволоки.

В работах [3], [4], [5] установлены зависимости условного предела прочности при сжатии МР (σ_b), наибольшей величины обратимой деформации (\bar{Y}_n), коэффициента рассеяния энергии (Ψ) и жесткости (C) УДЭ от технологических параметров материала:

$$\sigma_b = 0,65 \cdot 10^{-5} \sigma_{тн} \left(\frac{\rho_c}{\rho_3} \right)^3 \left(11,2 - \frac{\rho_n}{\rho_3} \right)^2;$$

$$\bar{Y}_n = \frac{\left[\left(4,0 - 7,8 \frac{\rho_c}{\rho_n} \right) \left(0,22 - 1,1 \frac{\rho_3}{\rho_n} + 0,005 \frac{d}{\delta} \right) + 0,78 \frac{\rho_c}{\rho_n} - 0,3 \right] \sigma_{тн}}{0,6 \cdot E_n \cdot 10^{-2}};$$

$$\Psi = 4 \left\{ \frac{(n-1)^2 + 6(n+1) \left[1 - \left(1 - \frac{Y_0}{A_0} \right)^n \right]}{(n+1)^2 + 4n - 2(n+1) \left[1 - \left(1 - \frac{Y_0}{A_0} \right)^n \right]} \right\};$$

$$C = \frac{\tau \left(1 - \frac{Y_0}{A_0}\right)^n}{A_0 \left[1 - \left(1 - \frac{Y_0}{A_0}\right)\right]}$$

где T , Y_0 , n — параметры петли гистерезиса, зависящие от технологических параметров УДЭ; A_0 — амплитуда деформации УДЭ.

Анализ приведенных соотношений показал, что влияние технологических параметров на свойства МР и готового изделия различно. В большей степени на упругие и прочностные свойства УДЭ влияют его плотность и степень опрессовки $\frac{\rho_c}{\rho_3}$; на жесткостные и диссипативные свойства большее

влияние оказывает относительный диаметр спирали $\frac{d}{\delta}$. Механические свойства изделий из МР также зависят от способа изготовления УДЭ: параметров коврика, заготовки и режимов прессования. Отклонение от технологии изготовления УДЭ может привести к существенному изменению характеристик готового изделия и потере системой амортизации своих виброзащитных свойств. Поэтому вопросам технологии изготовления УДЭ в настоящее время уделяется большое внимание.

Существуют различные способы изготовления упругих элементов для конкретных типов амортизаторов систем виброзащиты аппаратуры, агрегатов, систем управления и регулирования двигателей летательных аппаратов.

В качестве исходного материала для изготовления демфирующих элементов применяется металлическая проволока различных марок. Марка проволоки определяется условием работы упругого элемента: температурным режимом, наличием агрессивной среды и т. д. В условиях эксплуатации, исключающих коррозию, и при невысоких температурах может применяться пружинная проволока типа ОВС, 50ХФА; при высоких температурах и агрессивных средах — типа 12Х18Н10Т, ЭИ-708, ЭП-322 [2]. Диаметр проволоки определяется размерами УДЭ и требованиями к его механическим и стойкостным свойствам. Наибольшее распространение получила проволока диаметром от 0,05 мм до 0,5 мм. Спираль из перечисленных марок проволоки навивается виток к витку на специальных автоматах и полуавтоматах. Диаметр спирали может изменяться от 0,3 мм до 5,0 мм в зависимости от диаметра применяемой проволоки.

Процесс навивания спирали осуществляется пластическим деформированием проволоки на вращающемся коническом керне при обкатывании его роликом. Необходимые при этом соотношения усилий прижатия керна к ролику Q и натяжение проволоки N (рис. 1) подбираются опытным путем.

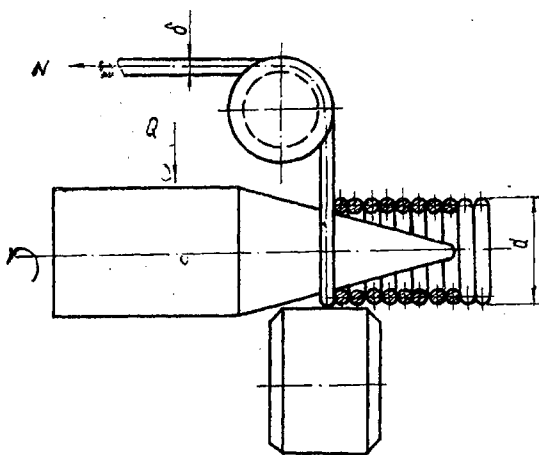


Рис. 1. Схема навивания спирали

В процессе навивания каждый предыдущий виток спирали за счет упругих сил проволоки несколько увеличивает свой диаметр и свободно смещается с керна последующим витком, обеспечивая непрерывность навивания на постоянно выбранном диаметре.

Полуавтомат для навивания вращающейся спирали включает в себя следующие основные узлы: корпус, электродвигатель, цанговый узел, прижимной узел, тормозное устройство, узел отсечки спирали.

Корпус (рис. 2, 3) состоит из станины 1 и основания 2, опирающегося на лампы с резиновыми амортизаторами 3. На корпусе располагаются все узлы полуавтомата.

Электродвигатель служит для привода во вращение цанги 4 с керном 5, прижимного ролика 6 и привода подвижного ножа отсечного устройства 7.

Цанговый узел обеспечивает вращение керна. Усилие прижатия керна к ролику регулируется винтом 8, расположенным в держателе шпинделя. Держатель шпинделя выполнен так, что, ослабив затяжку винтом 9, можно извлечь или установить заранее собранный в обойме шпиндель, а также перемещать его вместе с керном с целью регулировки процесса навивания спирали на любом из диаметров конического керна.

Прижимной узел служит для обеспечения вращения ролика 6. Крутящий момент с прижимного вала 10 передается на ролик трением. Необходимое для этого усилие обеспечивается пружиной 11.

Узел отсечки вращающейся спирали необходим для ограничения ее длины и возможного спутывания. Для изготовления УДЭ длина отрезка спирали составляет $0,5 \div 1,0$ м.

На полуавтомате рассмотренной конструкции можно навивать спираль из проволоки диаметром $0,1 \div 0,5$ мм. Диаметр спирали определяется диаметром керна и находится в пределах (5—15) δ. Производительность полуавтомата определяется массой спирали, навитой в течение часа, и зависит от числа оборотов керна и диаметров спирали и проволоки. Производительность описанного полуавтомата для проволоки диаметром 0,2 мм составляет 1,0 кг/ч.

Для изготовления УДЭ применяется также непрерывная спираль, которая получается пластическим деформированием проволоки путем ее обкатки планетарным роликом на вращающемся керне. На рис. 4 приведена схема автомата для навивания непрерывной спирали.

С ведущего конуса вариатора 1 вращение передается на вал 2 и kern 3. В обратном направлении через систему шестерен вращается барабан 4. При вращении барабана ролик 5 обкатывается по керну 3, образуя спираль.

Ролик 5 находится между дисками 6, 7. Диск 6 вращается вместе с валом, а диск 7 пружиной 8 прижимает к нему планетарный ролик, вращая его вокруг своей оси для уменьшения трения и износа при обкатывании керна. Подбор скорости вращения керна осуществляется вариатором до полного прекращения вращения навиваемой спирали. Недостатком автомата является его малая производительность (0,25 кг/ч).

Для изготовления УДЭ специального назначения применяется спираль с межвитковым давлением. Для получения такой спирали применяются полуавтоматы, в которых обкатывающий ролик имеет на цилиндрической поверхности канавки треугольного профиля с шагом, равным диаметру проволоки.

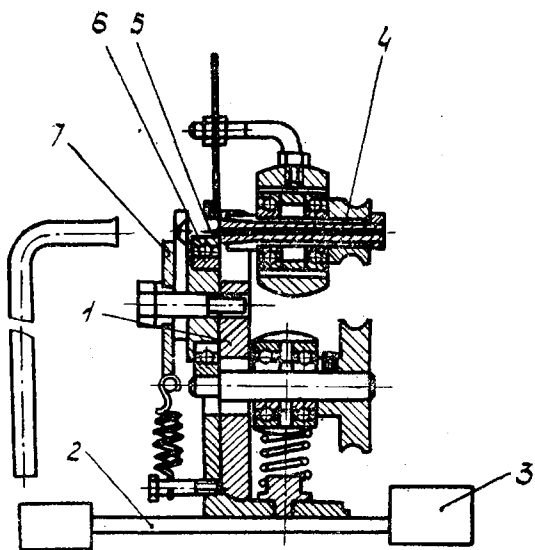


Рис. 2. Полуавтомат для навивания отрезков спирали (цанговый узел)

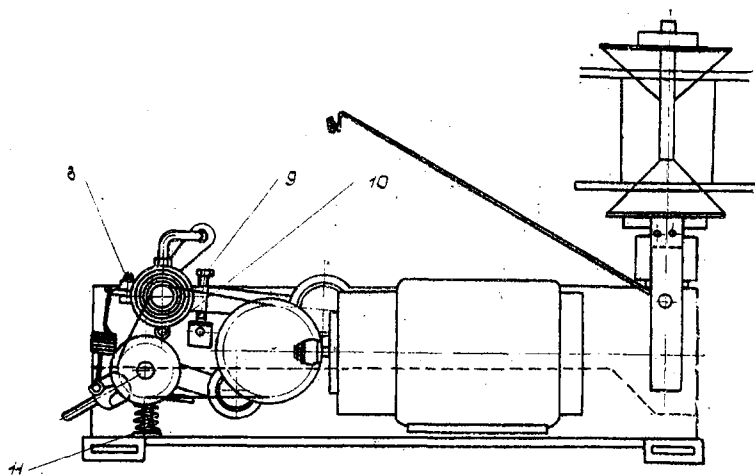


Рис. 3. Полуавтомат для навивания отрезков спирали (общий вид)

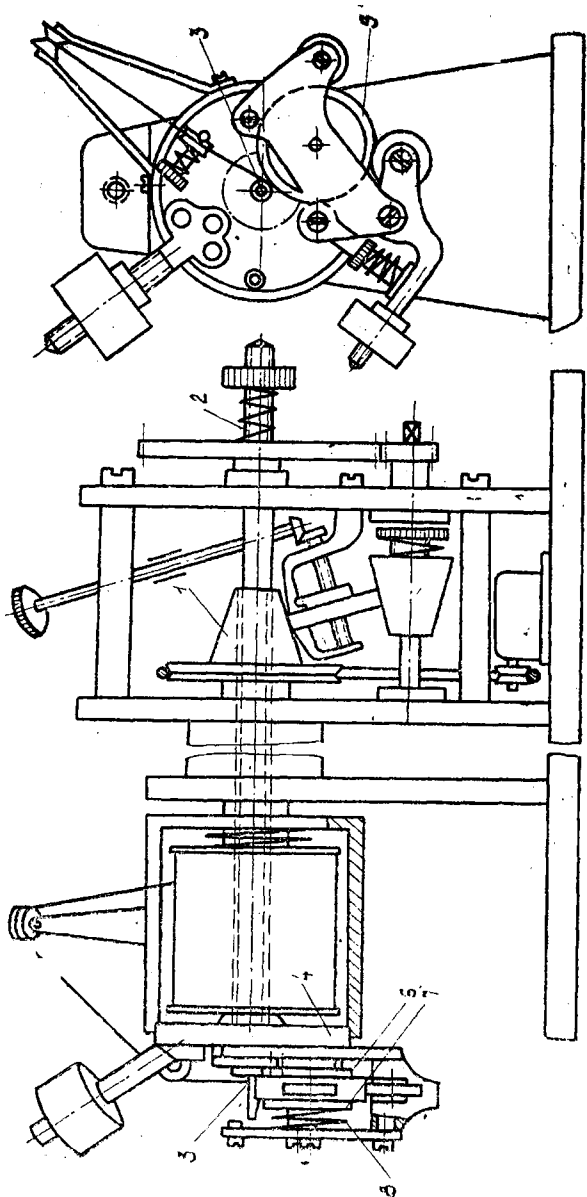


Рис. 4. Схема автомата для навивания непрерывной спирали

Производительность такого полуавтомата составляет 0,75 кг/ч. После навивания любым из рассмотренных методом спираль растягивается до шага, равного ее диаметру, формируется в заготовку, укладывается в пресс-форму и подвергается прессованию по форме УДЭ [5].

Такой способ изготовления УДЭ является общим для всех типов амортизирующих и демпфирующих устройств. Однако изготовление конкретного типа УДЭ имеет свои особенности в формировании заготовки. Например, при изготовлении амортизаторов типа ДК, ДКА, ДКБ заготовка формируется в виде сферы. Технология изготовления включает в себя следующие этапы.

1. Плотно навитая спираль дозируется по массе. Количество отдельных спиралей в навеске должно быть минимальным.

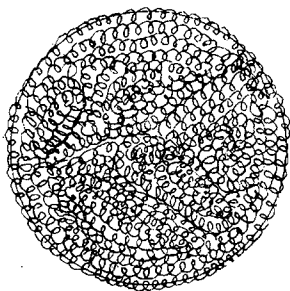


Рис. 5. Общий вид клубка из спирали ↑

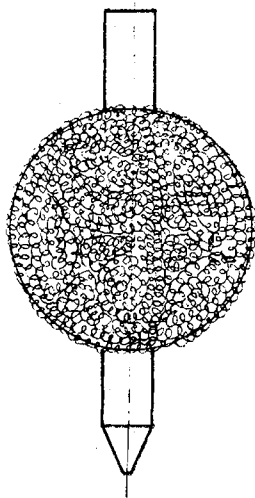


Рис. 6. Схема прокалывания заготовки иглой →

2. Одна из спиралей навески растягивается до шага, равного диаметру спирали, и хаотически укладывается в клубок (рис. 5). Затем аналогично растягиваются последующие спирали и хаотически наматываются на первоначально полученный клубок. Таким образом, происходит формирование клубка шаровидной формы диаметром, на 5—10% большим номинального диаметра амортизатора. Обмотка клубка на завершающей стадии изготовления (около 30% навески) должна

производиться в диаметральных плоскостях равномерным слоем. Конец последней обмоточной спирали заправляется внутрь клубка.

3. Оформленный шар прокалывается по диаметру в один или несколько проходов острой иглой через место заделки последней спирали (рис. 6). Биение сферы относительно иглы должно быть не более 1—2% от ее диаметра.

4. Заготовка с иглой помещается во втулку пресс-формы. С обеих сторон на иглу надеваются пуансон и матрица (рис. 7), после чего заготовка опрессовывается (рис. 8). Время поддержания номинального давления при прессовании составляет 5—10 с. Полученный упругий элемент извлекается из пресс-формы выдавливанием в сторону выпуклой поверхности.

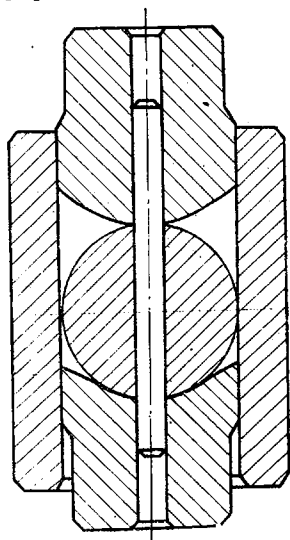


Рис. 7. Размещение заготовки в пресс-форме

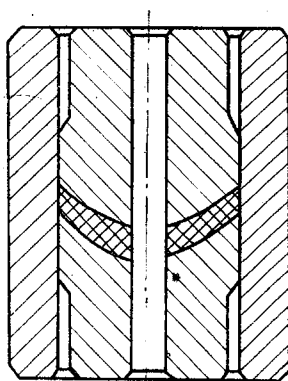


Рис. 8. Процесс прессования УДЭ

Изготовленный описанным способом упругий элемент используется в амортизаторах ДК и ДКБ.

Для увеличения статической прочности и демпфирования упругий элемент можно армировать специальным усиливающим жгутом, представляющим собой скрученную прядь проволоки. В этом случае вся навеска спирали делится на две части. Из первой половины спирали заготовка, формируется аналогично заготовке для амортизатора ДК [6]. Полученный

клубок с иглой обкатывается сверху усиливающим жгутом в меридиональных плоскостях через места входа и выхода иглы с периодическим поворотом через каждые пол-оборота на угол 300° (рис. 9). Концы жгута заправляются внутрь клубка около иглы под предыдущие витки жгута. Спираль второй навески также растягивается до шага, равного диаметру спирали, и наматывается поверх клубка, придавая ему окончательную форму шара. Полученная описанным способом заготовка укладывается в пресс-форму и опрессовывается.

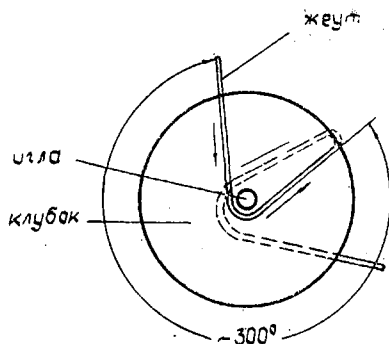


Рис. 9. Схема укладки усиливающего жгута на клубок спирали

Рассмотренная технология применяется при изготовлении УДЭ для амортизаторов типа ДКА. Формирование заготовки в виде сферы применяется также при изготовлении шайб, прокладок, мембран постоянной и переменной толщины.

Недостатком рассмотренного способа формирования заготовки является невозможность получения упруго-демпфирующих элементов с большим диапазоном изменения плотностей. Это связано с тем, что увеличение навески влечет за собой увеличение диаметра заготовки и затрудняет процесс введения ее во втулку пресс-формы без нарушения структуры МР. Уменьшение веса спирали приводит к увеличению рыхлости структуры заготовки и быстрому разрушению готового изделия. Плотность УДЭ для амортизаторов ДК изменяется в пределах $(2,5-3,5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Более широкий диапазон изменения плотности УДЭ (более чем в 3 раза) достигается при формировании заготовки в виде цилиндра или втулки. Такой вид заготовки применяется при изготовлении УДЭ для амортизаторов АЦВ, АЦП, АЦМ, АМГ, АК, а также для изготовления прокладок, мембран, шайб. Процесс изготовления УДЭ состоит из следующих этапов:

а) спираль дозируется двумя навесками. Первая составляет 75% от общего веса, вторая — 25%;

б) каждая спираль поочередно растягивается до шага, равного диаметру спирали, и хаотически укладывается в виде коврика равномерным слоем (рис. 10);

в) полученный коврик складывается в ленту (рис. 11) по линиям а—а, в—в (см. рис. 10) и скатывается по длине в рулон диаметром на 3—5% большим, чем диаметр втулки пресс-формы;

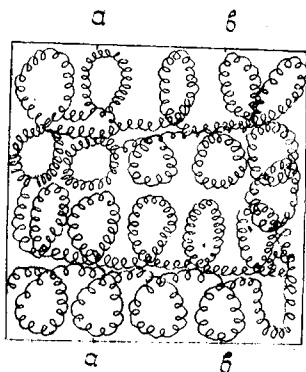


Рис. 10. Схема укладки спирали в коврик

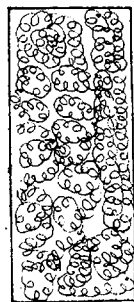


Рис. 11. Схема формирования ленты из коврика

г) рулон обматывается растянутой спиралью второй навески; концы спирали заправляются внутрь рулона. При изготовлении упругого элемента в виде втулки лента наматывается на центральный стержень пресс-формы (рис. 12), обматывается спиралью второй навески, укладывается в пресс-форму (рис. 13) и подвергается прессованию (рис. 14).

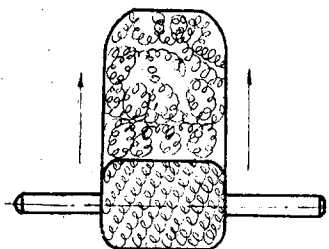


Рис. 12. Процесс скатывания ленты в рулон

Существует также способ изготовления втулочных УДЭ с упорядоченной укладкой спирали по винтовой линии. Особенность изготовления заготовок такого вида заключается в том, что растянутая до определенного шага спираль наматывается на центральный стержень пресс-формы. Намотка заготов-

ки осуществляется либо с определенным шагом, либо «внавал» со взаимным перекрещиванием спирали. Упругий элемент, изготовленный этим способом, воспринимает в большей степени нагрузку сжатия в направлении силы прессования и в меньшей нагрузке других направлений.

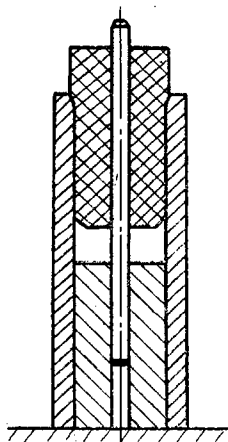


Рис. 13. Размещение заготовки в пресс-форме

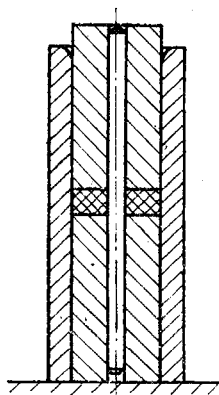


Рис. 14. Процесс прессования втулочного УДЭ

Кроме перечисленных способов изготовления заготовок, существуют специальные приемы формирования заготовок при изготовлении упругих элементов сложной формы (сферической, конической и др.). В этих случаях принцип формирования заготовки остается прежним: плотность спирали по сечениям готового изделия должна быть, по возможности, постоянной, а конструктивные решения этого условия могут быть различными для каждого конкретного случая.

Таким образом, при изготовлении УДЭ из материала МР могут применяться различные способы навивания спирали и укладки ее в заготовку. Однако во всех случаях следует соблюдать основные приемы формирования и опрессовки заготовки. Это позволит получать образцы с наименьшим разбросом механических характеристик и геометрических размеров УДЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. № 136608. Упругий элемент для систем демпфирования/Сойфер А. М., Бузицкий В. Н., Першин В. А. — Оpubл. в Б. И., 1965, № 5.
2. Бузицкий В. Н., Сойфер А. М. Цельнометаллические упруго-демпфирующие элементы, их изготовление и применение. — Науч. тр./Куйбыш. авиац. ин-т. 1965, вып. 19. Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов.
3. *Тройников А. А.* К вопросу о прочности материала МР при сжатии. — В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. — КуАИ, 1975, вып. 1.
4. *Тройников А. А.* Некоторые представления об упругих свойствах материала МР. — В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. — КуАИ, 1975, вып. 2.
5. Бузицкий В. Н., Тройников А. А. Расчет втулочных амортизаторов из материала МР, работающих на сжатие. — В сб.: Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. — КуАИ, 1976, вып. 3.
6. А. с. № 191280. Амортизатор/Бузицкий В. Н., Першин В. А., Пичугин А. Д., Сойфер А. М., Галь Б. В. — Оpubл. в Б. И., 1967, № 3.

УДК 539.432:620.178.3:620.193:621.438:621.515

В. Т. Трошенко, А. В. Прокопенко.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ГТД ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ

Уровень проектирования, технология и качество материалов, применяемых для изготовления лопаток компрессоров ГТД, как правило, исключают возможность разрушения новых лопаток при нагрузках, имеющих место в эксплуатации. Однако появление дефектов, вызывающих концентрацию напряжений, может привести к зарождению усталостных трещин. В этом случае важно знать, как в том или ином материале развивается трещина, а также иметь возможность оценить долговечность лопатки с трещиной. В статье описываются результаты исследования влияния дефектов на выносливость компрессорных лопаток ГТД и подход к оценке их долговечности на стадии развития усталостных трещин с использованием представлений линейной механики разрушения.

Исследовались компрессорные лопатки первых ступеней судового газотурбинного двигателя как новые, так и после эксплуатации в течение 12000—16000 ч [1].