

УДК 591.471.3:596

СОПРОТИВЛЕНИЕ КОСТНОЙ ТКАНИ ПЕРЕМЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЯМ

И. М. Пряхин

(Киевский институт инженеров гражданской авиации)

В процессе локомоции животного костная ткань опорно-двигательного аппарата испытывает действие переменных во времени напряжений, уровень которых различен у разных костей одной и той же конечности.

Известно, что в металлах при действии на них переменных напряжений, величина которых превышает определенный уровень, происходят необратимые изменения, которые по мере накопления числа циклов действия этих напряжений приводят к образованию трещины. Трещина, постепенно увеличиваясь, приводит к внезапному разрушению детали. Это явление называют усталостью металла.

Число случаев разрушения звеньев и деталей машин и механизмов от усталости весьма велико. Поэтому инженеры и ученые, работающие в различных отраслях народного хозяйства и науки, уделяют серьезное внимание изучению закономерностей усталости материалов и разработке методов технологического и конструкционного упрочения деталей машин и механизмов.

Как же работают в условиях действия переменных во времени напряжений кости опорно-двигательного аппарата живых организмов? Не происходят ли случаи возникновения в костях конечностей трещин усталости или даже усталостных изломов при движении животных? Не появлением ли усталостных трещин объясняется внезапно возникающая хромота у лошади и других домашних животных в условиях длительной непрерывной работы с большой перегрузкой, когда организм не успевает произвести «ремонт» возникших повреждений костной ткани на ходу? Чтобы ответить на эти и многие другие вопросы, необходимо произвести ряд исследований, включая и исследования на живых объектах.

В данной статье излагаются только результаты испытаний костной ткани, проведенных в лабораторных условиях.

Кости только что убитых животных подвергали чистому изгибу с частотой изменения напряжений 60 циклов в минуту. Коэффициент асимметрии цикла $r = -1$. Испытания проводили в воздушной среде при температуре 20° С. Материалом для исследования служили берцовые кости свиней в возрасте 10—12 месяцев. От каждой малой берцовой кости отрезали проксимальный и дистальный участки, а средняя часть кости длиной 170—180 мм служила образцом, так как на этом участке толщина и форма поперечного сечения кости были приблизительно одинаковы. На концах образца прикреплялись плоские захваты из стеклопластика, которые при установке образца в машину исключали возможность деформации кручения и возникновения больших напряжений сжатия костной ткани в местах зажима концов образца в испытательной машине. Испытания проводили на машине, спроектированной и изготовленной работниками лаборатории усталостной прочности Киев-

ского института гражданской авиации А. В. Карлашовым, В. П. Токаревым и А. Д. Гнатюком.

Известно, что физико-механические свойства костей зависят от их химического состава, возраста, пола и вида животного, а также от физиологического состояния организма (Акаевский, 1962). Кроме того, установлено, что механические свойства костной ткани изменяются по

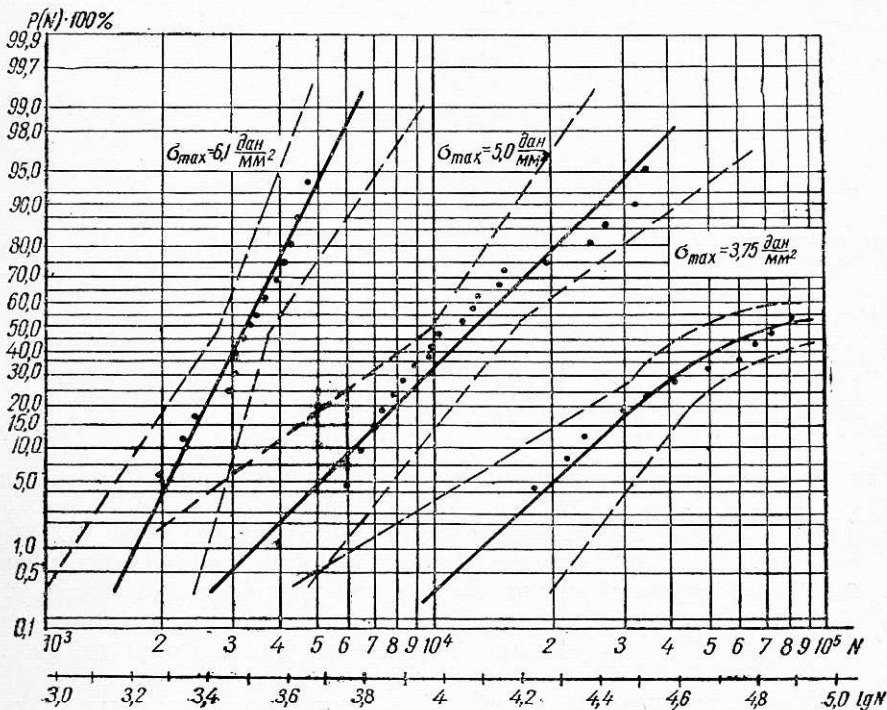


Рис. 1. Полная вероятностная диаграмма усталости костной ткани.

длине и поперечному сечению каждой кости опорно-двигательного аппарата животных (Манзий и др., 1965). Так как изучавшиеся образцы приготавливали из одной и той же кости животных одного и того же вида, то следовало ожидать, что механические свойства образцов, их геометрические свойства и размеры будут отличаться друг от друга. Учитывая все это, а также то, что при усталостных испытаниях наблюдается большое колебание числа циклов изменения напряжений и значительное рассеивание по долговечности, обусловленное статистической природой процесса усталостного разрушения, мы изучали сопротивление костной ткани животных переменным напряжениям и строили кривую усталости на основе испытания большого количества образцов на каждом уровне напряжения с применением для обработки результатов эксперимента методов математической статистики (Вентцель, 1964; Дунин-Барковский, Смирнов, 1955; Хальд, 1956).

Испытания проводили на четырех уровнях напряжений: $\sigma_{max} = 6.1 \text{ даН/мм}^2$, $\sigma_{max} = 5.0 \text{ даН/мм}^2$, $\sigma_{max} = 3.75 \text{ даН/мм}^2$ и $\sigma_{max} = 2 \text{ даН/мм}^2$. Уровни напряжения устанавливали по растягивающим напряжениям, так как этот вид деформации является для костной ткани наиболее опасным. На каждом уровне напряжения испытывали по 20 образцов, за исключением уровня $\sigma_{max} = 6.1 \text{ даН/мм}^2$, где было испытано 15 образцов ввиду меньшего рассеивания долговечности при усталостных испы-

таниях на высоких уровнях напряжений. За базу усталостных испытаний принято число циклов $N=0,9 \cdot 10^5$. Величина этого числа N была установлена с учетом физиологических возможностей животных. При

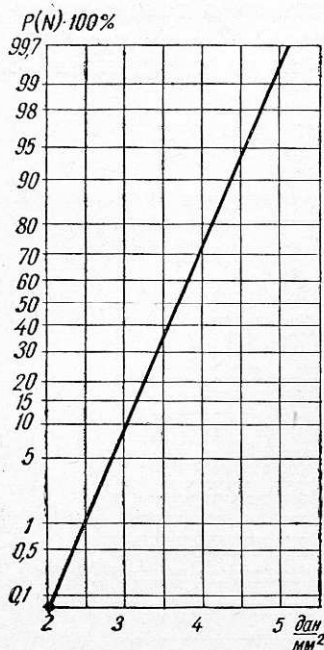


Рис. 2. График функции распределения условных пределов усталости.

проведении усталостных испытаний было выявлено, что костная ткань при действии переменных напряжений разрушается внезапно, причем число циклов до разрушения зависит от уровня напряжения. Разброс результатов усталостных испытаний по долговечности составил при $\sigma_{max}=6,1 \text{ дан/мм}^2 - \frac{N_{max}}{N_{min}} = 2,52$;

при $\sigma_{max} = 5,0 \text{ дан/мм}^2 - \frac{N_{max}}{N_{min}} = 5,82$.

Приведенные цифры показывают, что с уменьшением уровня напряжения разброс результатов усталостных испытаний костной ткани по долговечности, как и у материалов, применяемых в технике, увеличивается.

Результаты усталостных испытаний образцов костной ткани приведены в сводной таблице. При уровне напряжения $\sigma_{max} = 3,75 \text{ дан/мм}^2$ до числа циклов $N=0,9 \cdot 10^5$, принятого за базу испытаний, разрушилось только 11 образцов, а при $\sigma_{max}=2 \text{ дан/мм}^2$ — ни один из образцов не разрушился. В таблице для неразрушившихся образцов указано число циклов, принятое за базу испытаний, так как при достижении указанного числа циклов изменения напряжений дальнейшее испытание образца прекращалось.

В результате статистической обработки результатов усталостных испытаний при использовании логарифмически нормального закона рас-

Количество циклов (N) до разрушения образца

$\sigma_{max}=2 \frac{\text{дан}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_{max}=3,75 \frac{\text{дан}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_{max}=5,0 \frac{\text{дан}}{\text{мм}^2}$	$\sigma_{max}=6,1 \frac{\text{дан}}{\text{мм}^2}$
90000	18360	6030	1890
90000	21825	6480	2295
90000	22530	7065	2430
90000	29340	7380	2970
90000	35280	7700	3015
90000	41190	8145	3060
90000	50345	8730	3200
90000	61155	9575	3330
90000	65340	9720	3555
90000	72045	10890	3695
90000	81195	12825	3900
90000	90000	14000	4100
90000	90000	14130	4230
90000	90000	15480	4500
90000	90000	15930	4770
90000	90000	19350	—
90000	90000	25650	—
90000	90000	28000	—
90000	90000	33480	—
90000	90000	35100	—

предела определения долговечности была построена полная вероятностная диаграмма усталости, характеризующая зависимость вероятности разрушения $P(N)$ от долговечности в циклах при уровнях напряжений $\sigma_{max}=6,1$ дан/мм², $\sigma_{max}=5,0$ дан/мм² и $\sigma_{max}=3,75$ дан/мм² (рис. 1).

Пользуясь полной вероятностной диаграммой (рис. 1) и графиком функции распределения условных пределов усталости (рис. 2), были

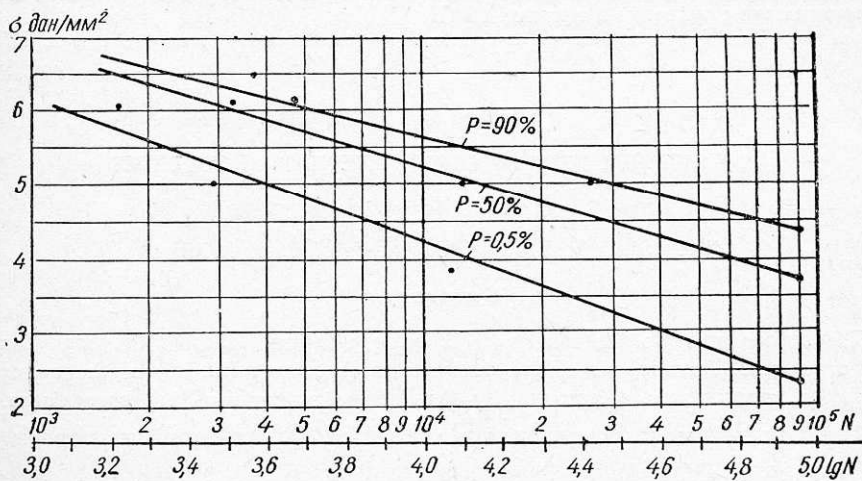


Рис. 3. Кривые усталости костной ткани при вероятностях разрушения $P(N)$ 0,5, 50 и 90%.

построены кривые усталости костной ткани, отвечающие вероятностям разрушения $P(N)$ 0,5, 50 и 90% (рис. 3).

Общий вид кривых усталости костной ткани (на графике) соответствует виду этих кривых для материалов, применяемых в технике. Пользуясь изображенными на рис. 3 кривыми усталости, можно для каждого уровня напряжения определить предельно допустимое число изменений напряжения до разрушения костной ткани.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные лабораторные испытания показывают, что костная ткань живых организмов при действии переменных по величине напряжений, превышающих определенное численное значение, претерпевает усталостное разрушение.

2. Для костей опорно-двигательного аппарата различных видов животных могут быть построены кривые усталости и определены условные пределы усталости.

3. Анализ построенных кривых усталости показывает, что при любой вероятности разрушения $P(N)$ с уменьшением уровня напряжения число циклов изменения напряжений до появления усталостного излома увеличивается.

4. Надежность работы опорно-двигательного аппарата живых организмов при длительном и непрерывном воздействии на него значительных переменных нагрузок определяется усталостной прочностью костных тканей, что до сих пор не учитывалось в практике эксплуатации домашних животных.

ЛИТЕРАТУРА

- Акаевский А. И. 1962. Анатомия домашних животных. М.
Манзий С. Ф., Мельник К. П., Воронкин Н. Ф., Пряхин И. М. 1965. Исследования прочности трубчатых костей как основных звеньев локомоторного аппарата млекопитающих. В кн.: «Прикладная механика» (сб. научн. раб. КИГА).
Вентцель Е. С. 1964. Теория вероятностей. М.
Дуниин-Барковский И. В., Смирнов Н. В. 1955. Теория вероятности и математическая статистика в технике. ГТТИ.
Хальд А. 1956. Математическая статистика с техническими приложениями. ИЛ.

Поступила 22.I 1966 г.

BONE TISSUE RESISTANCE TO ALTERNATING VOLTAGES

I. M. Pryakhin

(Kiev State Institute of Engineers of Civil Aviation)

Summary

The author presents the results of laboratory fatigue tests of the bone tissue of living organisms. An analysis of the data shows that the reliability of the animal fulcrum-motor apparatus is determined by the fatigue strength of the bone tissue. This has not yet been taken into account in the practice of working domestic animals.