

В. П. ИВАНОВ, Н. Д. СТЕПАЧЕНКО,
Р. В. ЧУРАЕВ

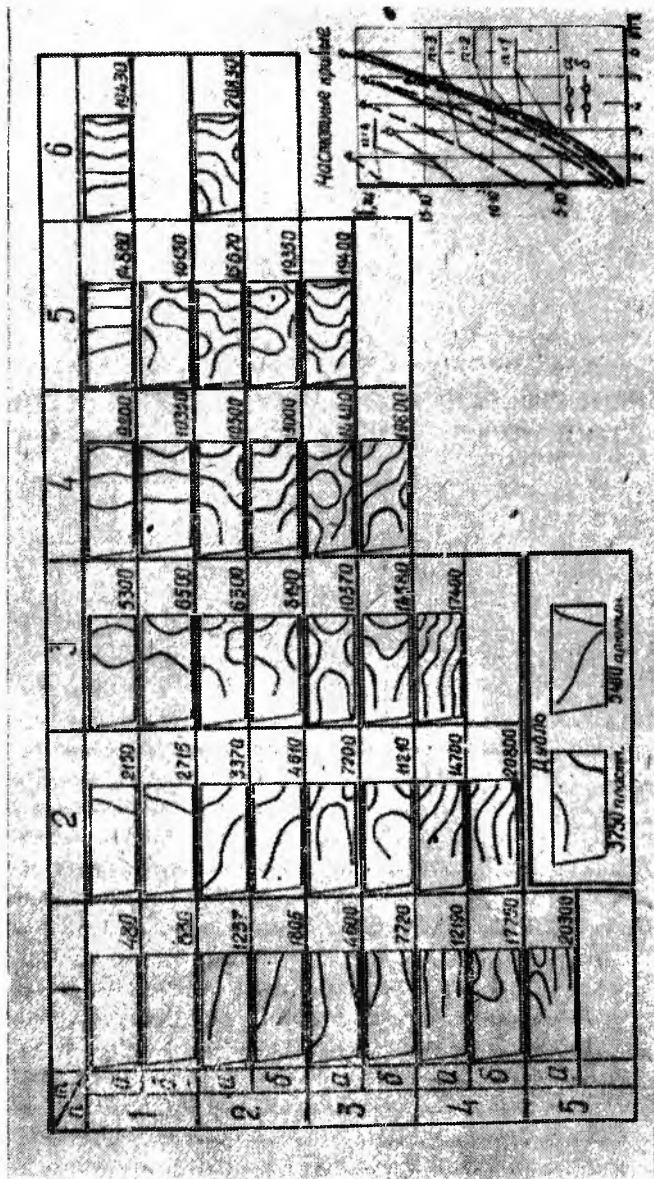
НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ

Для широкого использования стеклопластиков необходимо решить большой круг задач, связанных с исследованиями механических свойств материала и прочности натуральных конструкций при статическом и динамическом нагружениях.

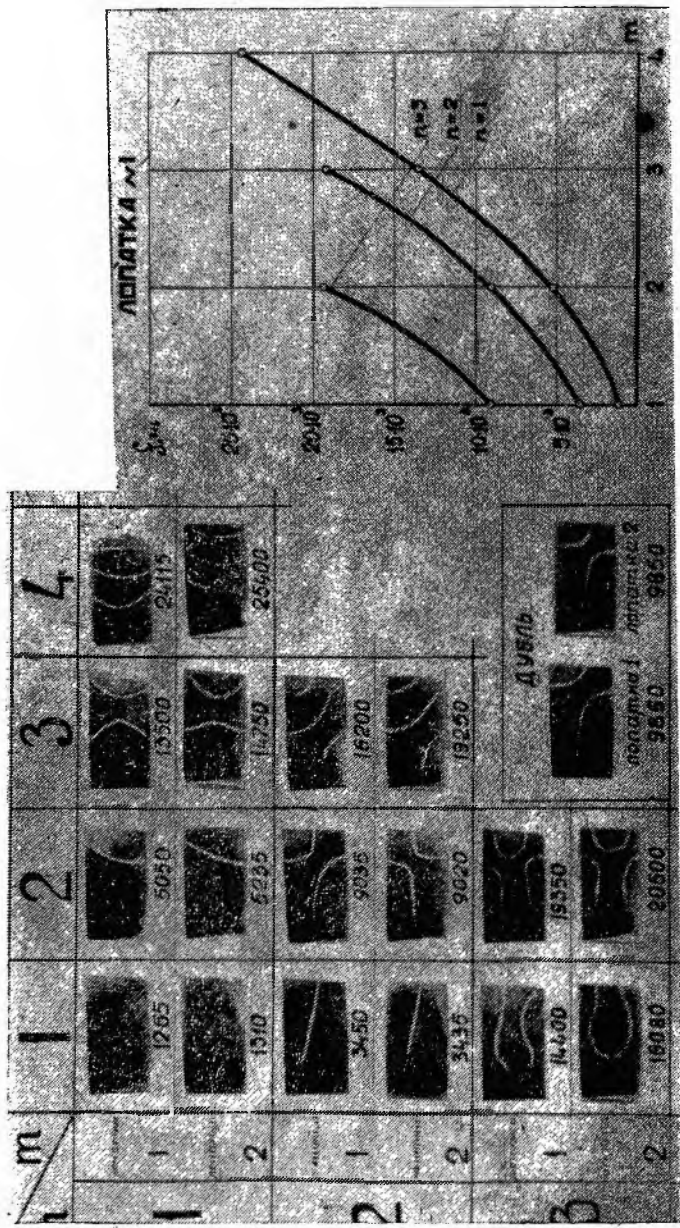
В статье освещаются вопросы, касающиеся вибрационных испытаний стеклопластиковых компрессорных лопаток и анализируются особенности их поведения при вибрационном нагружении.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И АНАЛИЗ СПЕКТРА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ЛОПАТОК

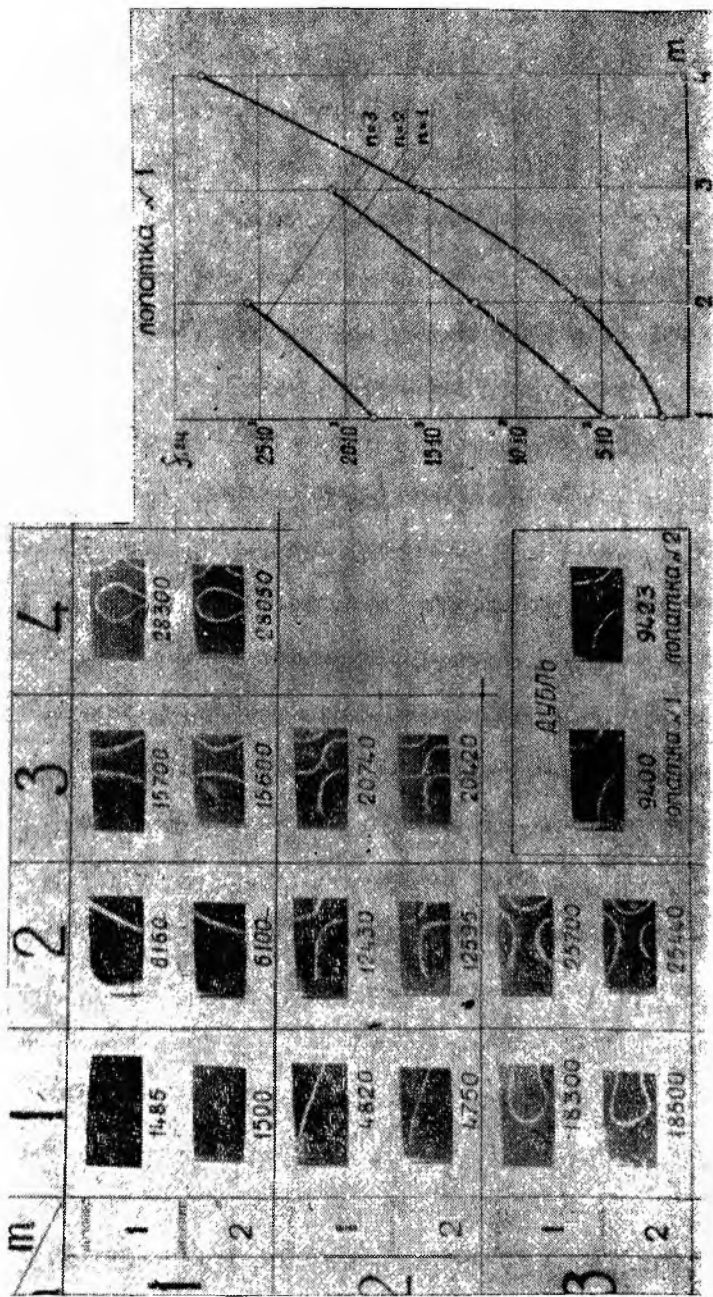
Классификация собственных движений лопаток турбомашин на основе перечисления всех возможных собственных движений, соответствующих заданному отрезку частот, данная в работе [1], применима и к стеклопластиковым лопаткам. Для ее построения воспользуемся понятием гипотетической пластинки, являющейся моделью ортотропной пластинки постоянной толщины, у которой модули упругости 1-го рода в двух взаимно перпендикулярных направлениях равны между собой, а коэффициенты Пуассона и модули сдвига для главных направлений равны нулю. Систему собственных форм гипотетической пластинки по отношению к системе форм колебаний реальной пластинки будем именовать системой исходных форм. При трансформации гипотетической пластинки в реальную непрерывным изменением упругих констант материала и геометрии пластинки происходит процесс преобразования ортогональных собственных форм гипотетической пластинки (исходных форм) в ортогональные собственные



Фиг. 1. Спектр собственных форм и частот лопаток I:
 а — стеклопластик; б — алюминий.



Фиг. 2. Спектр собственных форм и частот стеклопластиковых лопаток II.



Фиг. 3. Спектр собственных форм и частот металлических лопаток II.

движения реальной. Этот процесс сопровождается искажением исходных форм, каждой из которых будет соответствовать единственная собственная форма реальной пластинки [1].

Система исходных форм исчерпывает все возможные собственные движения пластинки и на этой основе может производиться анализ спектра частот и форм колебаний лопаток, материал которых при динамическом нагружении имеет линейную характеристику жесткости.

Для возбуждения колебаний лопаток эксперимент производился с использованием малогабаритного электродинамического вибратора. Собственные частоты колебаний и соответствующие им рисунки узловых линий определялись известными методами.

На фиг. 1 и 2 представлены спектры собственных форм и частотные кривые стеклопластиковых лопаток (I и II) и для сопоставления спектры форм металлических лопаток (лопатка I, на фиг. 1, лопатка II на фиг. 3) идентичной геометрии.

При проведении эксперимента никаких трудностей, связанных с повышенной демпфирующей способностью материала, не отмечалось. Рисунки узловых линий, как правило, аналогичны наблюдаемым на металлических лопатках, что косвенно свидетельствует о близости характера распределения относительных деформаций по перу стеклопластиковых и металлических лопаток. По результатам эксперимента стеклопластиковые лопатки можно рассматривать (без учета фактора времени) как упругие анизотропные тела с линейной характеристикой упругости, т. е. к ним применимы положения относительно классификации собственных форм и частот [1].

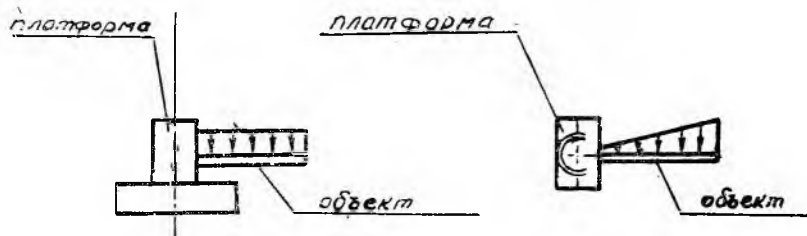
Числовые значения частот стеклопластиковых лопаток ниже, чем металлических. При этом наибольшая разница (до 40%) наблюдается для пластиночных форм, что связано с анизотропией конструкции, вызванной ориентировкой большего числа слоев материала в направлении оси лопатки. В связи с этим число возможных резонансных режимов в заданном диапазоне частот для стеклопластиковых лопаток увеличивается по сравнению с металлическими.

Анизотропия упругих свойств стеклопластиков позволяет производить отстройку от резонансных режимов без изменения геометрии пера лопатки путем различной ориентации волокон материала относительно ее оси.

УСТАЛОСТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЛОПАТОК

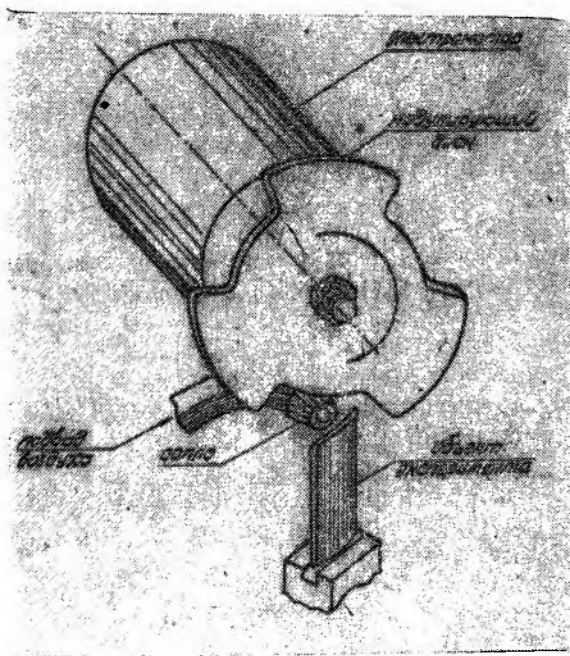
Для достижения необходимого уровня переменных напряжений при проведении резонансных испытаний в широком диапазоне частот на различных собственных формах необходимо обеспечивать не только высокий уровень возбуждающих сил, но и управлять их распределением без искажения упруго-массовых характеристик лопаток. По способу нагружения испытываемого

объекта вибраторы можно подразделить на три группы: с контактным, кинематическим и бесконтактным нагружением. Для возбуждения резонансных колебаний лопаток наиболее широко используются электродинамические вибраторы (кинематическое возбуждение) и воздушные вибростенды (бесконтактное возбуждение).



Фиг. 4. Распределение возбуждающих сил при кинематическом возбуждении консольной балки постоянного сечения.

При кинематическом возбуждении (фиг. 4) уровень возбуждающих сил прямо пропорционален удельному весу материала объекта эксперимента, амплитуде перемещений подвижной платформы и квадрату частоты возбуждения. Возможности по управлению распределением возбуждающих сил на электродинамических вибраторах ограничены и их эффективность существенно падает с повышением частоты. При возбуждении колебаний на воздушных вибростендах возбуждающее усилие создается пульсирующей струей воздуха, истекающего из сопла (фиг. 5), что по сравнению с возбуждением электродинамическими вибраторами является более эффективным средством, особенно если объект эксперимента изготовлен из материала с низким удельным весом и имеет малые габариты [2].



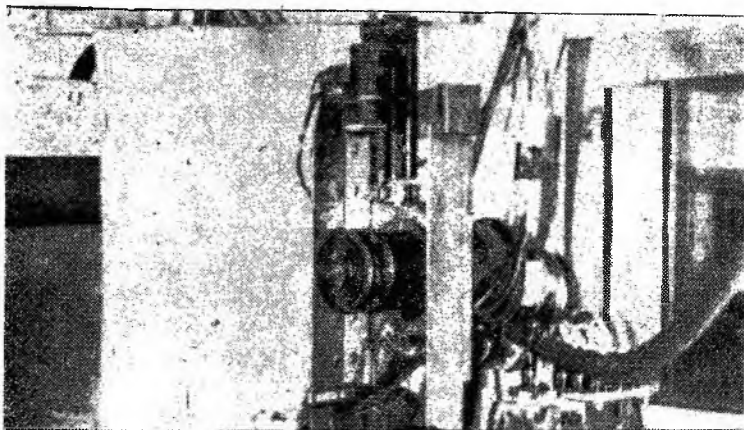
Фиг. 5. Возбуждение колебаний пульсирующей струей воздуха

На фиг. 6 представлен общий вид вибростенда КуАИ-ВВ-3,

КуАИ-ВВ-3,

разработанного на базе стенда КуАИ-ВВ-2А и предназначенного для проведения резонансных испытаний в диапазоне частот 100 — 5000 гц.

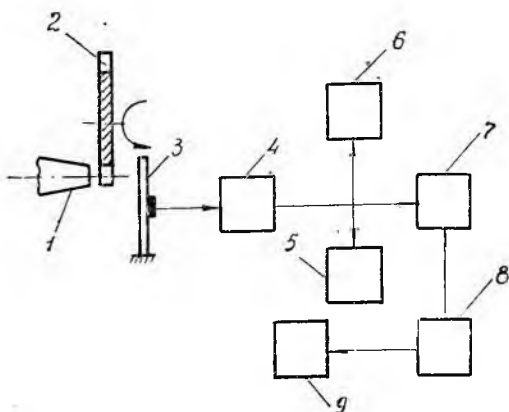
Проведению усталостных испытаний лопаток на воздушных вибростендах предшествует определение собственных частот и форм колебаний. Для обеспечения наиболее эффективного возбужде-



Фиг. 6. Общий вид вибростенда КуАИ-ВВ-3.

ния резонансных колебаний и облегчения настройки на резонансный режим необходимо знать рисунки узловых линий исследуемых форм и их частоты.

Блок-схема установки для резонансных усталостных испытаний лопаток представлена на фиг. 7. Зажатие хвостовика лопатки в замке осуществляется усилием, равным центробежной силе пера. Это приходится иметь в виду, так как при отработке методики установлено влияние усилия затяжки на усталость вследствие существенной анизотропии механических свойств замка и малого сопротивления стеклопластика сдвигу. Возбуждение лопатки осуществляется модулированной струей воздуха, истекаю-



Фиг. 7. Блок-схема установки для усталостных испытаний лопаток:

1 — сопло; 2 — модульный диск; 3 — лопатка; 4 — тензоусилитель; 5 — прибор контроля относительных деформаций; 6 — счетчик циклов; 7 — электронный осциллограф; 8 — звуковой генератор; 9 — частотомер.

шей из сопла 1. Сигнал с контрольного тензодатчика, наклеенного на лопатку 3, усиливается тензометрическим усилителем 4 и подается на вход прибора контроля уровня относительных деформаций 5. Испытания проводятся при постоянных относительных деформациях по контрольному тензодатчику.

Поддержание постоянства уровня относительных деформаций производится с точностью не менее 2—3% по показанию контрольного прибора и осуществляется изменением давления воздуха на входе в сопло или изменением положения вибратора относительно лопатки. Счет циклов производится счетчиком импульсов 6. Резонансный режим испытаний контролируется с помощью осциллографа 7 и звукового генератора 8. Частота возбуждения определяется числом оборотов модулирующего диска 2 и определяется по частотомеру 9.

Выбор места наклейки контрольных тензодатчиков производится исходя из эпюры распределения относительных деформаций по перу. Так как стеклопластики обладают малой жесткостью и малым удельным весом, то, как показали эксперименты, наклейка большого количества тензодатчиков может приводить к искажению упруго-массовых характеристик лопатки и к искажению эпюры распределения относительных деформаций. Поэтому распределение относительных деформаций, полученное таким образом, носит иногда качественный характер.

Более достоверно места максимальных относительных деформаций могут быть установлены по усталостному разрушению на исследуемой форме.

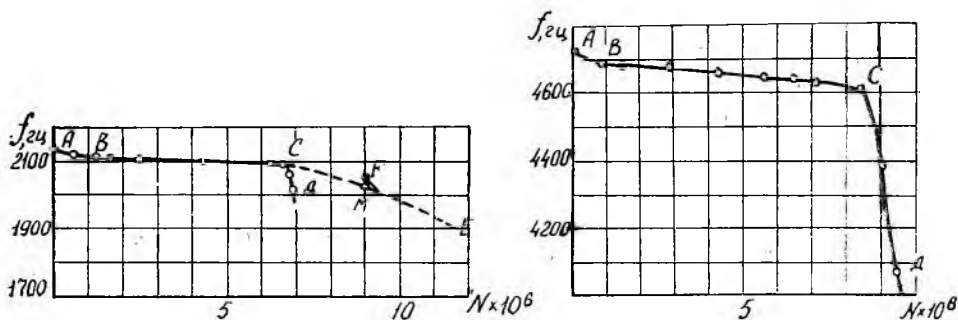
Основным вопросом методики проведения усталостных испытаний является выбор способа нагружения, учитывающего эксплуатационные условия работы и возможность оценки запаса вибрационной прочности по вибрационной напряженности лопаток на работающем двигателе.

Усталостные испытания в процессе эксперимента можно проводить, поддерживая постоянными относительные деформации или напряжения. Испытания лопаток рационально проводить при постоянных относительных деформациях, так как на работающем двигателе производится замер величины относительных деформаций. Поэтому в принятой методике испытания проводятся при постоянных относительных деформациях.

Интенсивный обдув воздухом приближает условия эксперимента к эксплуатационным.

Другим важным методическим вопросом усталостных испытаний является правильный выбор и обоснование критерия усталостного разрушения. Как показывают усталостные испытания, при вибрационном нагружении отмечается уменьшение резонансной частоты по времени, зависящее для конкретной лопатки от формы колебаний и уровня относительных деформаций. Это связано с развитием макротрещин и с разогревом материала из-за внутреннего трения при малой теплопроводности материала.

На фиг. 8 представлены графики изменения резонансной частоты в зависимости от наработки стеклопластиковой лопатки для двух форм колебаний — второй изгибной $f = 2135$ гц и первой пластиночной $f = 4720$ гц. Наиболее интенсивное падение частоты наблюдается в первоначальный момент нагружения в зоне *AB*. Зона *BC* представляет наклонный участок прямой линии. Характер изменения резонансной частоты от числа циклов в зонах *AB* и *BC*, а также протяженность зон зависят от уровня относительных деформаций формы колебаний и геометрических размеров лопатки. Снижение частоты в зоне *AB* составляет 0,5—1%, в зоне *BC* — 0,2÷1,2%. Наклон участка кривой правее точки *C* зависит



Фиг. 8. Изменение резонансной частоты при вибрационном нагружении лопатки из стеклопластика:

a — вторая изгибная форма колебаний, $f = 2135$ гц, $\epsilon = 252 \cdot 10^{-5}$;

б — первая пластиночная форма колебаний, $f = 4720$ гц, $\epsilon = 238 \cdot 10^{-5}$

от места расположения усталостного дефекта по перу лопатки, т. е. в основном определяется формой колебаний и изменением характеристики жесткости по перу.

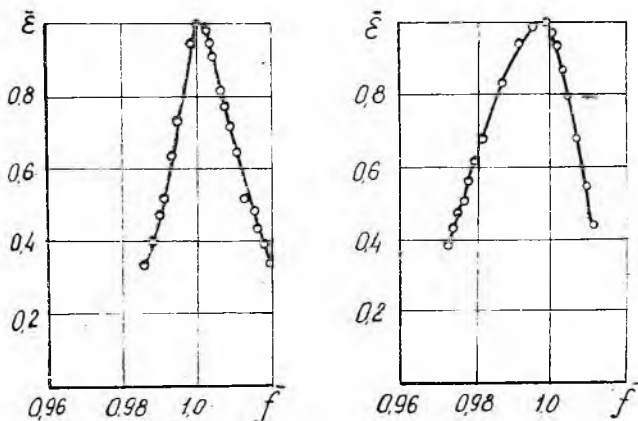
Кривая *CD* соответствует случаю, при котором образовавшуюся при усталостных испытаниях трещину можно развить до полного разрушения лопатки. Резонансная частота при этом резко уменьшается. Возможен и такой случай, когда усталостный дефект расположен в сечении, имеющем большую площадь, или проявляется в виде отслоения отдельных волокон материала. Кривая уменьшения резонансной частоты *CE* (фиг. 8а) уже не имеет ярко выраженного спадающего характера, хотя и наблюдается некоторое уменьшение резонансной частоты. При снятии нагрузки и последующем нагружении отмечается увеличение частоты — точка *F* на фиг. 8а, однако частота при этом быстро уменьшается до исходной (точка *M*) или меньшей величины. Усталостный дефект развивается медленно, но прогрессивно, о чем можно судить по увеличению демпфирующей способности лопатки с увеличением числа циклов нагружения.

На фиг. 9 представлены резонансные кривые, снятые при колебаниях лопатки по второй изгибной форме до появления отслоения волокон в прикорневом сечении и непосредственно после его появления.

Логарифмический декремент колебаний, оцененный по ширине резонансной кривой, равен $\delta=0,0486$ до появления дефекта и $\delta=0,08$ после его появления.

Наработка дефектной лопатки $N=5,10^6$ циклов привела к увеличению декремента до $\delta=0,127$ без существенного развития дефекта.

Основываясь на отмеченных особенностях поведения лопаток из стеклопластиков при вибрационном нагружении, в качестве



Фиг. 9. Резонансные кривые при колебаниях лопатки по второй изгибной форме:

a — до отслоения волокон, $f=2082$ гц; *б* — после отслоения волокон, $f=2066$ гц.

критерия усталостного разрушения принято резкое уменьшение резонансной частоты колебаний. Контроль наличия усталостных дефектов может быть осуществлен в процессе испытаний оценкой демпфирующей способности лопатки по ширине резонансной кривой.

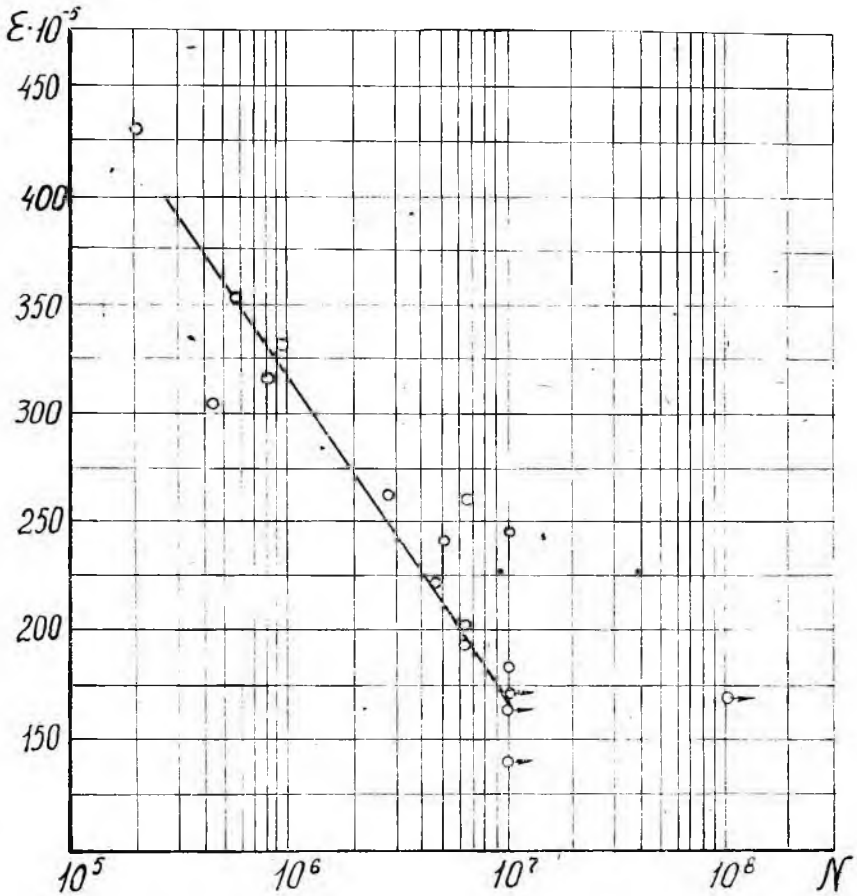
По описанной методике были проведены усталостные испытания лопаток при колебаниях по первой пластиночной форме. Диаграмма усталости в координатах $\epsilon - \lg N$, построенная по корреляционному уравнению, представлена на фиг. 10:

Предел усталости на базе $N=10^7$ циклов равен $\epsilon_{-1}=168 \cdot 10^{-5}$,

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕМПФИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛОПАТОК И МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Экспериментальное определение параметров, характеризующих демпфирование, связано с известными трудностями. Наиболее широкое применение нашел метод оценки демпфирования по

затухающим колебаниям [3]. Однако в некоторых случаях этот метод практически неприменим из-за трудности получения исходных сведений и их расшифровки.



Фиг. 10. Диаграмма усталости лопатки I при колебаниях по первой пластинчатой форме.

В этих случаях наиболее приемлемой является оценка демпфирования по параметрам резонансной кривой [4]:

$$\delta = \frac{\pi \Delta f}{f},$$

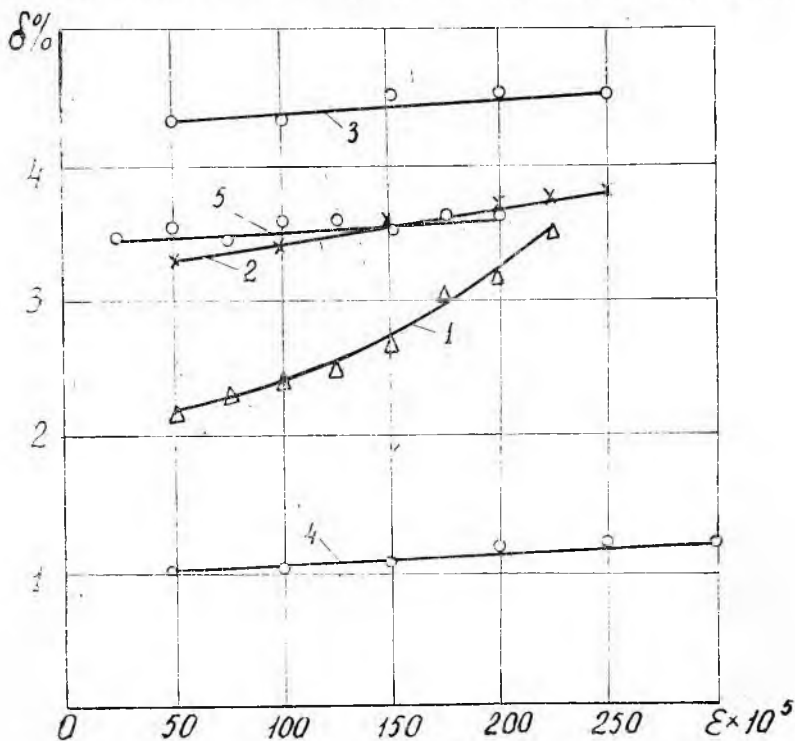
где δ — декремент колебаний;

f — резонансная частота;

Δf — ширина резонансной кривой, соответствующая относительным деформациям, равным 0,707 от максимальной величины.

Использование этого метода теоретически обосновано лишь для линейных систем с одной степенью свободы. Не вызывает сомнений его пригодность и для линейных систем с распределенными параметрами, когда собственные частоты отстоят друг от друга достаточно далеко.

Оценка пригодности этого метода применительно к стеклопластикам, обладающим (обычно слабой) нелинейностью, производилась путем сопоставления результатов, полученных по затуха-



Фиг. 11. Демпфирующая способность лопатки I на различных формах колебаний:

1 — I изгибная форма, $f=180$ гц; 2 — II изгибная форма, $f=2150$ гц;
3 — I пластинчатая форма, $f=4750$ гц; 4 и 5 — однонаправленный
стеклопластик при продольной и поперечной ориентации волокон, соответ-
ственно.

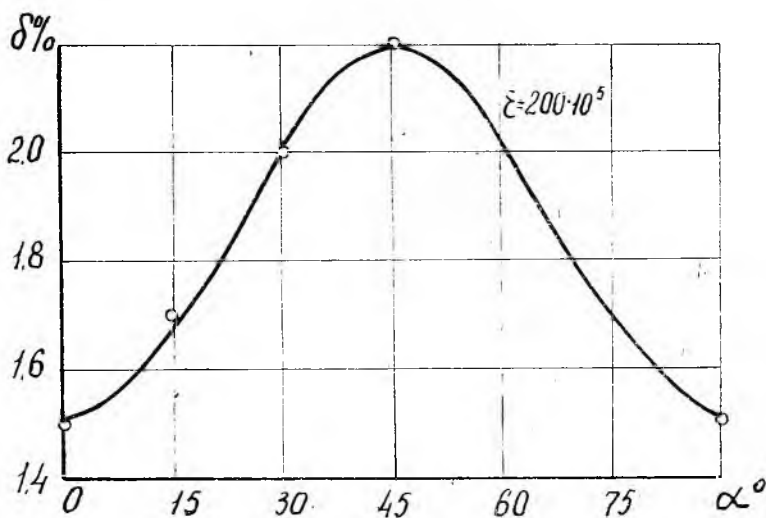
ющим колебаниям и по параметрам резонансной кривой. Сопоставление этих результатов производилось на лопатках (I изгибная форма, $f=480$ гц; II изгибная форма, $f=2150$ гц) и на образцах при изгибных колебаниях (I форма, $f=1000$ гц; II форма, $f=3000$ гц).

Разница между декрементами, полученными различными методами при одинаковых относительных деформациях, не более 10%, что дало основание производить оценку рассеяния энергии при высокочастотных колебаниях по ширине резонансной кривой.

Возбуждение резонансных колебаний производилось с помощью высокочастотного воздушного вибростенда КуАИ-ВВ-3.

Результаты исследования рассеяния энергии лопаток (в материале и замке) при колебаниях по первой и второй изгибным формам и по первой пластиночной форме колебаний представлены на фиг. 11.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что демпфирующая способность стеклопластиковых лопаток зависит от формы собственных колебаний. При изгибных колебаниях рассеяние энергии на второй форме больше, чем на первой; особенно существенно различие при низком уровне относительных деформаций. Наибольшее рассеяние энергии отмечено на пластиночной форме



Фиг. 12. Влияние ориентации армирующих элементов на демпфирующую способность стеклопластика.

колебаний. Из рассмотрения графиков фиг. 11 следует также, что при колебаниях по высокочастотным формам декремент несущественно увеличивается с ростом относительных деформаций. Форма колебаний лопатки характеризуется присущим ей рисунком узловых линий, определяющим эпюру распределения относительных деформаций.

Так как лопатку можно рассматривать как ортотропную конструкцию, то направление действующих при колебаниях напряжений относительно армирующих элементов на различных формах колебаний отличается. Это может явиться причиной различия декрементов на разных формах. Проверка такого предложения выполнена на образцах. На фиг. 11 (кривые 4 и 5) приведены данные по декрементам для однонаправленного стеклопластика при продольной и поперечной ориентации армирующих элементов

относительно действующих усилий, свидетельствующие о существенной зависимости рассеяния энергии в материале от направления усилий относительно армирующих элементов. Исследование закономерности изменения декремента от ориентации армирующих элементов относительно усилий выполнено на образцах, имеющих соотношение продольных и поперечных слоев 1:1. Результаты исследования представлены на фиг. 12. Приведенный график свидетельствует о возможности рассмотрения характеристики рассеяния энергии в материале как анизотропной. Для описания усталостной прочности и упругих констант применимы известные соотношения [5]. Анизотропия демпфирующей способности, связана со сдвиговыми деформациями, вызванными нормальными напряжениями, и может быть описана аналогичными соотношениями.

Формула для декремента колебаний имеет вид:

$$\delta_{\alpha} = \delta_0 (\cos^4 \alpha + b \sin^2 2\alpha + c \sin^4 \alpha) (1 + \eta_{\alpha}^2),$$

где α — угол между направлением волокон и продольной осью образца;

η_{α} — коэффициент взаимного влияния, характеризующий сдвиги от нормальных напряжений

$$c = \frac{\delta_{90}}{\delta_0}; \quad b = \frac{\delta'_{45}}{\delta_0} - \frac{c+1}{4}; \quad \delta'_{45} = \frac{\delta_{45}}{1 + \eta_{45}^2}.$$

Используя приведенное соотношение и располагая экспериментально полученными данными по рассеянию энергии на образцах с продольной, поперечной и диагональной укладкой (δ_0 , δ_{90} и δ_{45}) армирующих элементов, можно вычислить декремент для любого направления по отношению к армирующим элементам.

ВЫВОДЫ

Стеклопластиковые лопатки можно рассматривать как упругое анизотропное тело. При экспериментальном определении и анализе форм колебаний целесообразно руководствоваться классификацией собственных форм на основе перечисления всех возможных собственных видов движений.

Анизотропия упругих свойств ориентированных стеклопластиков может быть использована для отстройки от резонансных режимов без изменения геометрии пера лопатки.

Числовые значения собственных частот колебаний у стеклопластиковых лопаток меньше, чем у металлических той же геометрии и размеров. Это приводит к возможности появления большего числа резонансных режимов, в связи с чем становятся более актуальными исследования усталостной прочности и демпфирующей способности лопаток при колебаниях по сложным высокочастотным формам.

Высокочастотные воздушные вибростенды КуАИ-ВВ-3 и КуАИ-ВВ-2 позволяют эффективно возбуждать резонансные

колебания стеклопластиковых лопаток и, в том числе, на сложных высокочастотных формах. Интенсивный обдув лопаток воздухом приближает условия испытаний к эксплуатационным.

На стендах можно проводить исследования усталостной прочности материала при высоких частотах нагружения (100—10000 *гц*). В качестве образца используется пластинка, защемленная одним концом.

Усталостные испытания лопаток целесообразно проводить при постоянном уровне относительных деформаций. Это облегчает оценку запасов прочности лопаток по данным тензометрирования.

Оценку рассеяния энергии при колебаниях лопаток по высокочастотным формам целесообразно производить по ширине резонансной кривой.

Демпфирующая способность стеклопластиков является анизотропной и при нагружении вдоль главных направлений армирования мало зависит от уровня относительных деформаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Иванов, Н. Д. Степаненко. К вопросу об определении спектров собственных форм и частот лопаток турбомашин. Труды КуАИ. Вып. XIX, 1965.

2. В. П. Иванов, В. Т. Огородов. Высокочастотный воздушный вибростенд. Труды КуАИ. Вып. XIX, 1965.

3. Г. С. Писаренко. Колебания упругих систем с учетом рассеяния энергии в материале. Изд. АН УССР, Киев, 1955.

4. R. Plunkett. «Measurement of damping», «Structural damping». Pergamon Press, Oxford, Longon, New York, Paris, 1960.

5. Е. К. Ашкенази. Анизотропия механических свойств некоторых стеклопластиков. ДНТП, Ленинград, 1961.