

## КОНТРОЛЬ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ИММЕРСИОННЫМ МЕТОДОМ

*А. П. Румянцев, Л. Р. Федорова*

Турбинные лопатки являются ответственными деталями, от прочности которых зависит работа всей турбины.

Контроль турбинных лопаток в настоящее время производится рентгенографическим и люминесцентным методами, а также с помощью поверхностных ультразвуковых волн. Эти методы имеют ряд существенных недостатков. Люминесцентный метод и метод поверхностных ультразвуковых волн пригодны только для обнаружения поверхностных дефектов. Рентгенографический контроль хотя и является сквозным, однако не обнаруживает такого важного типа дефектов, как трещины.

С помощью ультразвукового сквозного контроля можно было бы обнаружить любой тип дефектов, но этот вид контроля осуществить довольно трудно вследствие сложности конфигурации турбинной лопатки.

Несмотря на это в работе все же сделана попытка проконтролировать турбинные лопатки по всей толщине с помощью ультразвуковых колебаний.

Широко распространенный в нашей промышленности контактный метод ультразвукового прозвучивания оказался в данном случае непригодным из-за сложности формы турбинной лопатки. Пришлось прибегнуть к методу погружения и прозвучивания через слой жидкости (иммерсионный метод).

Иммерсионный метод лишь недавно начал внедряться в промышленность. По сравнению с контактным методом он является более громоздким, так как требует специальных приспособлений и ванн для создания жидкостного контакта. Ванны эти могут быть стационарными, либо локальными, переносными. Однако, если рассмотреть преимущества иммерсионного метода, по сравнению с контактным методом, то приходится делать вывод, что иммерсионный метод оправдывает произведенные на него затраты. Главнейшие из этих преимуществ следующие: во-первых, иммерсионный метод обеспечивает постоянство акустического контакта. При контактном методе на поверхность детали наносится слой жидкой смазки. Это может быть масло, солидол, или какая-нибудь вязкая жидкость. Оператор надавливает на щуп рукой и при этом, в зависимости от величины нажатия, толщина масляной прослойки меняется. А с изменением толщины прослойки резко изменяется процент ультразвуковой энергии, проходящей в металл. При иммерсионном методе контакт постоянен, так как ультразвуковые лучи идут через слой жидкости. Из постоянства акустического контакта вытекает однозначная зависимость высоты сигнала,

полученного от дефекта на экране дефектоскопа, от величины и характера самого дефекта. Во-вторых, создается возможность фокусировки. При контактном методе фокусировка требует специальных приспособлений. При иммерсионном методе можно ставить непосредственно фокусирующий излучатель, либо фокусировать ультразвуковой пучок с помощью вогнутого отражателя. Следствием фокусировки является повышение разрешающей способности метода. Возможность

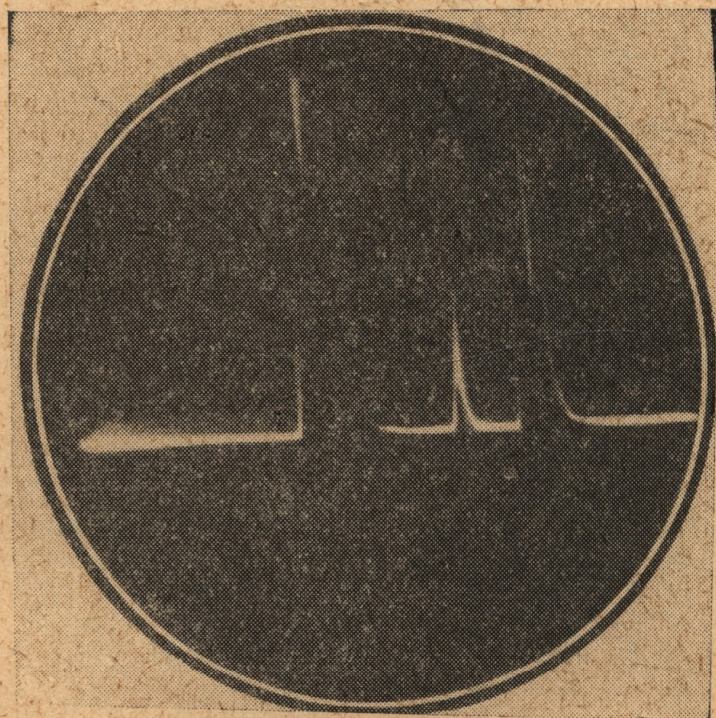


Рис. 1. Типичная осциллограмма прозвучивания детали ультразвуковым иммерсионным методом.

контроля деталей сложной конфигурации также является преимуществом иммерсионного метода. Это связано с возможностью качания луча. Кроме того, иммерсионный метод не требует для производства контроля дополнительной обработки поверхности — зачистки.

И, наконец, самым важным преимуществом иммерсионного метода, по сравнению с контактными, является возможность автоматизировать и механизировать весь процесс контроля. Таким образом, иммерсионный метод является более современным и больше отвечает потребностям и нуждам промышленности.

Типичная осциллограмма, получаемая на экране дефектоскопа при прозвучивании деталей иммерсионным методом, показана на рис. 1.

На экране имеем три сигнала: слева сигнал от ближней верхней поверхности детали, справа — от дальней нижней и между ними сигналы от дефектов.

Опыты проводились на промышленном дефектоскопе УЗД-7Н, при этом применялась частота 2,5 мгц. Излучатель — керамика титаната бария. В качестве среды, передающей ультразвуковые колебания, применялась вода с добавкой соды для предотвращения коррозии стальных деталей.

Для осуществления контроля лопаток турбин применялся метод обкатки кардановой каретки со щупом по профилю лопатки, рис. 2. Это дает возможность соблюдать необходимое постоянство угла на-

клона оси щупа к вертикали в каждой точке профиля лопатки и выдерживать постоянное расстояние между щупом и поверхностью лопатки. Кроме того, при этих условиях угол преломления поперечной волны, с помощью которой производится контроль, все время лежит в интервале между первым и вторым критическими углами. Для пары вода — сталь этот интервал находится в пределах  $14^\circ \div 28^\circ$ . Если не будет соблюдаться постоянство угла ввода ультразвукового луча в

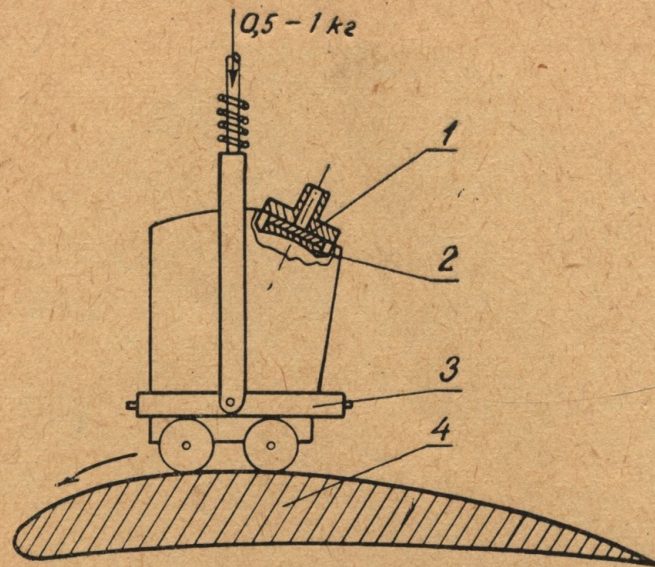


Рис. 2. Схема обкатки кардановой каретки со щупом по профилю турбинной лопатки: 1 — излучатель; 2 — фокусирующая линза; 3 — кардановая каретка; 4 — сечение турбинной лопатки.

тело лопатки, то не исключена возможность, что вследствие кривизны профиля во многих точках поверхности угол преломления поперечной волны выйдет из указанного интервала. Тогда ультразвуковой луч, вместо того чтобы войти в лопатку, скользнет по поверхности, либо отразится от нее и уйдет в воду.

В кардановой каретке, несущей щуп, предусматриваются три угла, под которыми возможен контроль лопатки:  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $26^\circ$ . Соответствующие углы преломления луча в теле лопатки:  $35^\circ$ ,  $48^\circ$  и  $75^\circ$ . Комбинируя при дефектоскопировании эти три угла оператор может «прощупать» найденный дефект со всех сторон и получить представление не только о его величине, но и о конфигурации.

Перемещение щупа параллельно поверхности дефектоскопируемой лопатки складывается из равномерного, реверсивного и шагового, продольного движений. В зависимости от диаметра ультразвукового пучка в месте входа в исследуемое тело величина шага равна  $3.5 \div 6$ . Схема поперечного перемещения щупа изображена на рис. 3. Продольное перемещение всего механизма осуществляется при помощи шагового двигателя.

Наиболее сложной для прозвучивания частью лопатки является галтель. В виду того, что кардановая каретка не может двигаться по галтели, из-за малых радиусов кривизны, было изготовлено специальное приспособление, позволяющее обеспечить постоянство углов ввода ультразвукового луча в галтель. Конструктивно это приспособление изображено на рис. 4.

После прозвучивания пера лопатки 7 в кардановую каретку 6 вставляется вместо щупа приспособление для прозвучивания галтели.

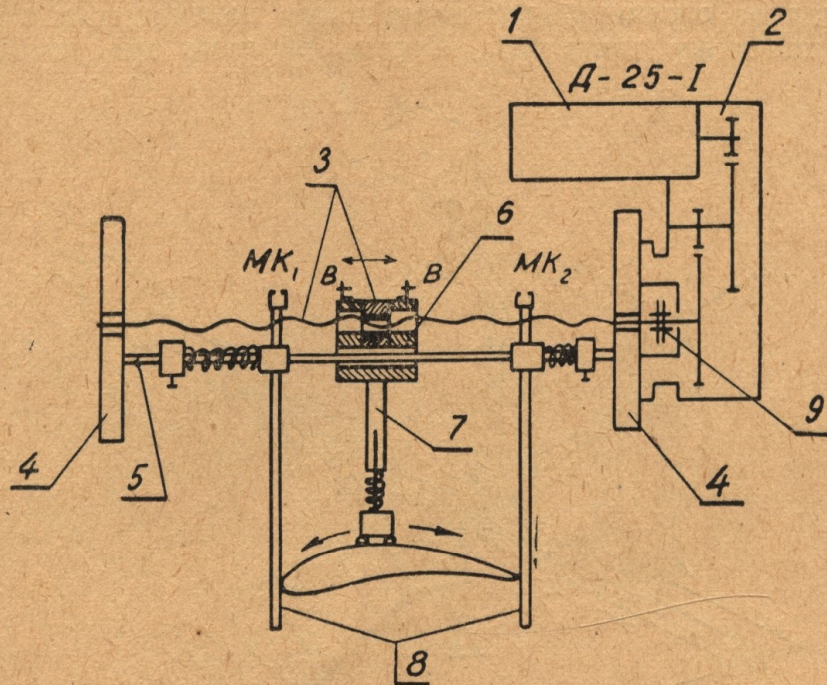


Рис. 3. Схема поперечного перемещения щупа по поверхности турбинной лопатки:  
 1 — двигатель; 2 — редуктор; 3 — винтовая пара; 4 — опоры; 5 — направляющие штанги; 6 — рабочая каретка; 7 — система прижима кардановой каретки; 8 — ограничители перемещения кардановой каретки с переключателями реверса двигателя; 9 — соединительная муфта.

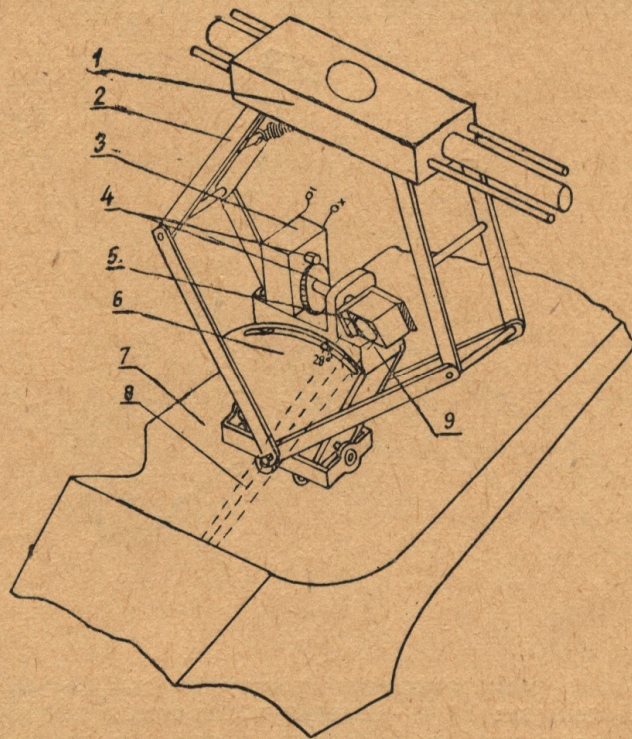


Рис. 4. Схема приспособления для прозвучивания галтели турбинной лопатки.

На пульпе управления всей установки отключается тумблером цепь, идущая от ограничителей поперечного перемещения кардановой каретки к шаговому двигателю. Таким образом мы устанавливаем

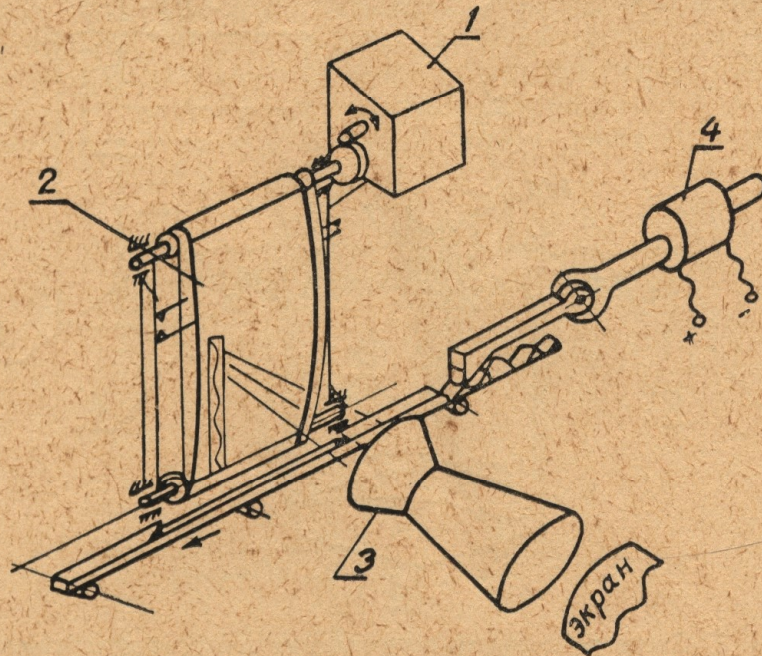


Рис. 6. Механизм записи сигналов с экрана блок-приставки УЗД-7Н:

1 — реверсивный двигатель; 2 — фотокассета; 3 — фотообъектив; 4 — шаговый механизм.

наш механизм поперечного перемещения щупа в каком-то сечении пера лопатки, расположенном на некотором расстоянии от галтели. Наш

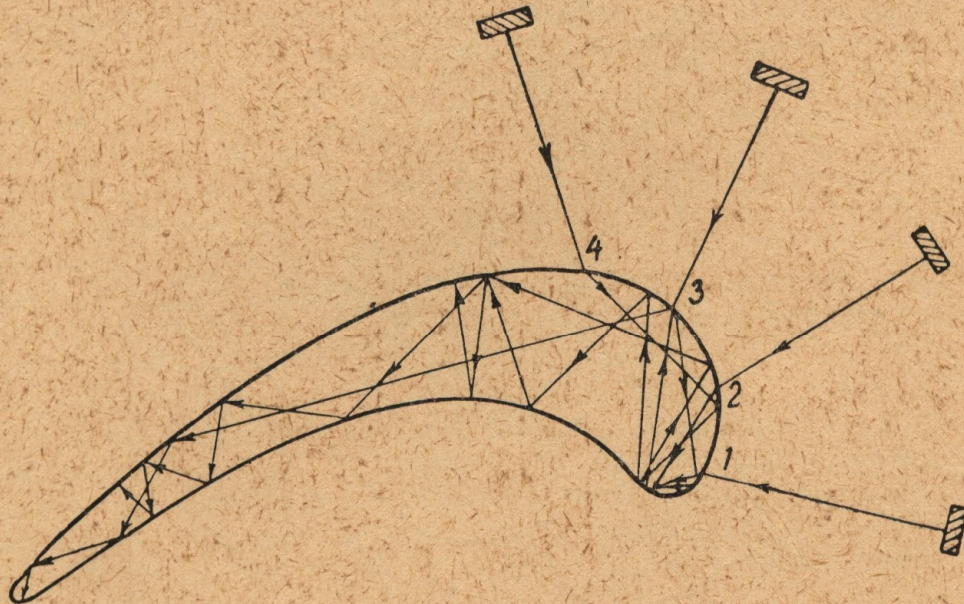


Рис. 7. Схема распространения ультразвуковых лучей в сечении турбинной лопатки: 1+4 — отдельные положения щупа над поверхностью турбинной лопатки в процессе контроля.

механизм будет совершать по сечению лопатки только поперечные движения. Двигатель 3, соединенный с ограничителями поперечного перемещения  $МК_1$  и  $МК_2$ , при их замыкании, через зубчатую пару 4, будет передавать вращение щупу 5, который посылает ультразвуко-

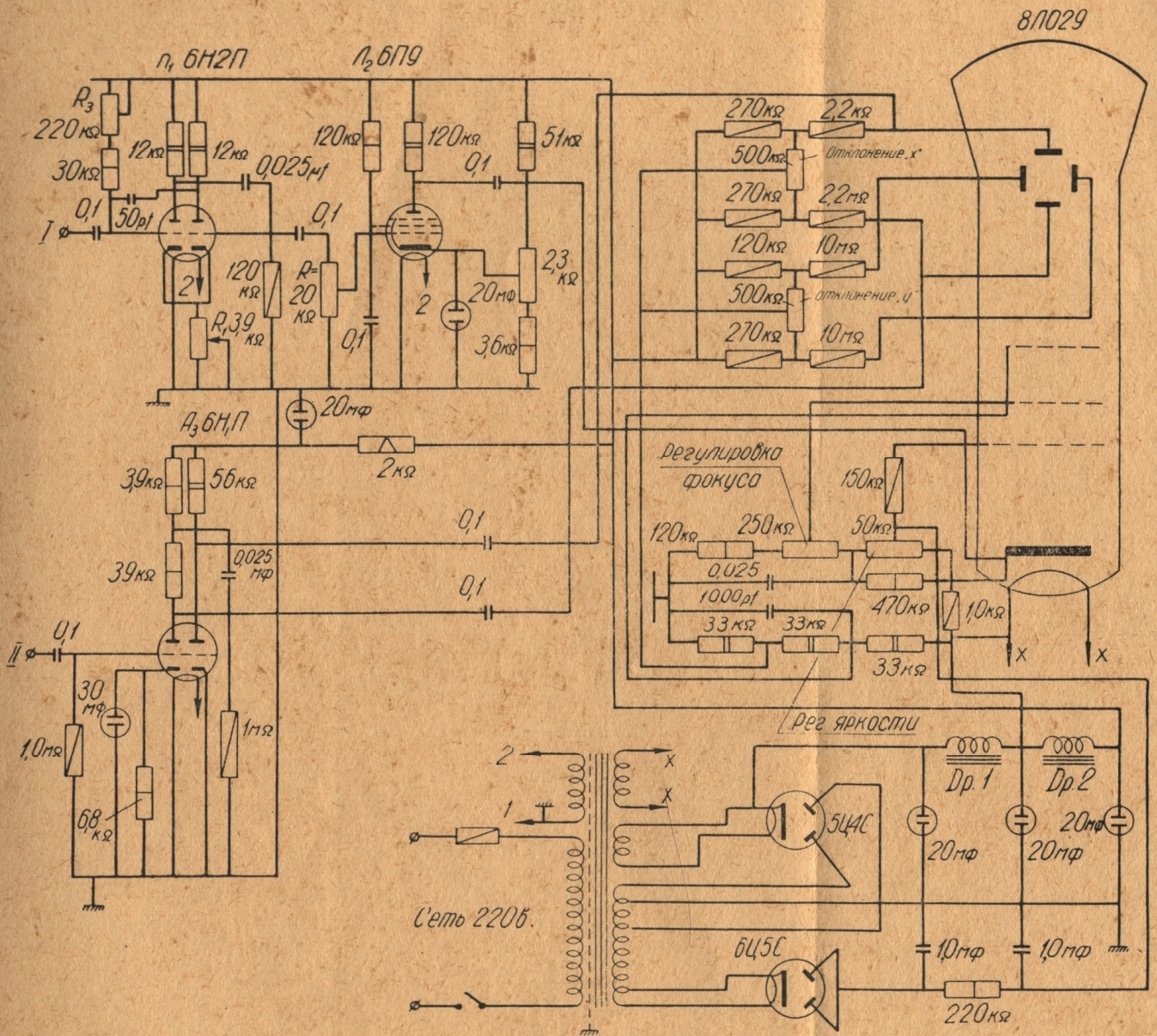


Рис. 5. Схема блок-приставки к УЗД-7Н.

вые колебания 8 в галтель лопатки 7. Кардановая каретка 6, при помощи параллелограмма 2 и исполнительной каретки 1, перемещается по поверхности лопатки 7, вправо и влево, до замыкания контактов  $МК_1$  и  $МК_2$  ограничителя поперечного перемещения. Само приспособление 9 устанавливается в пазы кардановой каретки в трех фиксированных положениях, соответствующих углам 15, 20 и 26°.

Для записи результатов контроля была сконструирована блок-приставка к дефектоскопу УЗД-7Н, собранная по схеме рис. 5, кото-

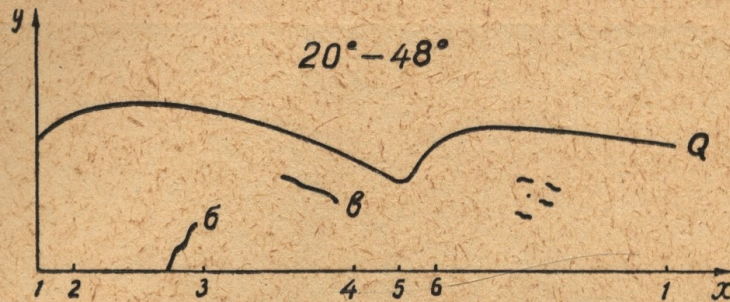


Рис. 8. График следов сигналов, записанный с экрана блок-приставки при прозвучивании сечения турбинной лопатки.

рая преобразует пиковые сигналы в точечные. Таким образом, на экране электронно-лучевой трубки входной и донный сигналы представлены в виде светящихся точек. Сигналы от дефекта, тоже в виде светящихся точек, располагаются в интервале между ними.

Если перед экраном электронно-лучевой трубки блок-приставки протягивать светочувствительную бумагу или пленку, то мы получим запись следов сигналов на всем пути перемещения щупа, рис. 6.

Из-за сложности конфигурации лопатки траектория распространения лучей в ее сечениях также чрезвычайно сложна, рис. 7.

Характер осциллограмм на экране дефектоскопа зависит от траектории распространения лучей в теле лопатки и изменяется в соответствии с изменением этой траектории.

Однако для всех осциллограмм остается общим то, что сигналы от ближайшей верхней поверхности лопатки (входные сигналы) на всех осциллограммах находятся на определенном расстоянии от начала отсчета (от начального импульса).

Сигналы от противоположной нижней поверхности лопатки (донные сигналы) смещаются по оси развертки. При этом величины этих смещений однозначно зависят от отрезков пути, проходимых лучем в теле лопатки. Чем длиннее путь луча в теле лопатки, тем больше смещается донный сигнал вправо по оси развертки, и наоборот. На фотобумаге получаем график, прочерченный входным, донным и дефектным сигналами. Входной сигнал соответственно дает прямую, а донный — кривую. При наличии дефектов на графике появляются кривые, которые располагаются между ними. Это дает возможность проанализировать характер дефектов, их расположение и величину. Так как перемещение щупа синхронизировано с движением луча на экране электронно-лучевой трубки, то на бумажной ленте мы получаем двухмерное сечение детали вдоль движущегося луча, рис. 8.

Ось  $x$ -ов совмещена с прямой, прочерченной входными сигналами; кривая  $a$  прочерчена донными сигналами;

кривая  $b$  соответствует характеру перемещения сигналов от трещины, идущей от поверхности в глубь лопатки;

кривая *в* и группа точек на графике являются отражениями наличия расслоения и пор в сечении лопатки.

Как видно из графика, кривые, характеризующие дефекты, являются их однозначным отображением, если речь идет о глубине дефектов, и точным отображением их ориентации и расположения в данном сечении лопатки.

Таким методом было проконтролировано свыше 50 дефектных сечений турбинных лопаток. При этом были зафиксированы следующие

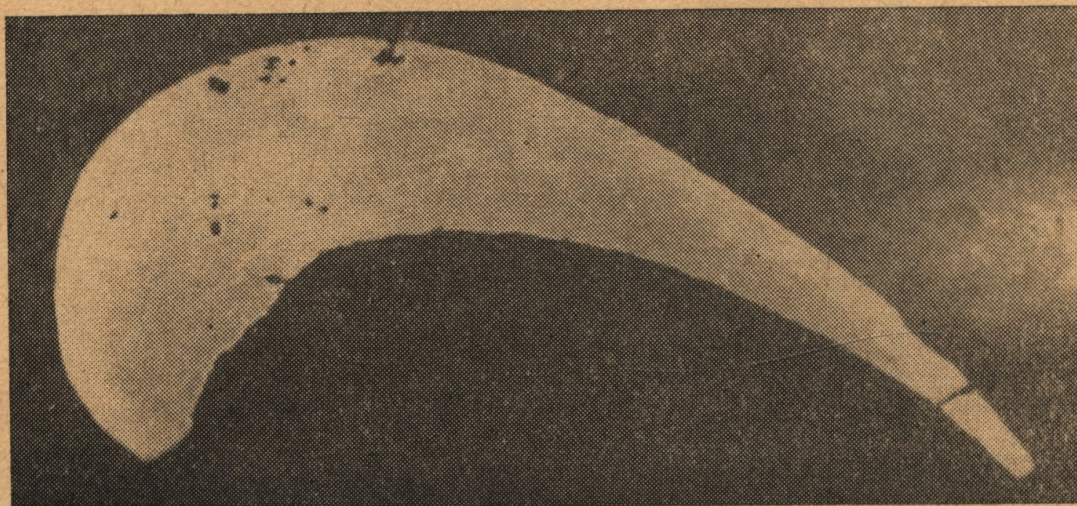


Рис. 9. Сечение турбинной лопатки с дефектами.

щие виды дефектов: трещины, расслоения, поры, раковины. Одно из дефектных сечений турбинной лопатки представлено на рис. 9.

Чувствительность данного метода, при соответствующей резонансной настройке пьезоэлектрического датчика и приемного усилителя дефектоскопа, оказалась достаточной для обнаружения дефекта с эквивалентной площадью отражения, равной  $1 \text{ мм}^2$ .

## ВЫВОДЫ

1. В результате проделанной работы была разработана методика иммерсионного ультразвукового контроля деталей сложной конфигурации — турбинных лопаток.

2. Осуществлен сквозной, автоматический контроль.

3. Чувствительность данного метода позволила обнаруживать дефекты любого типа (любую несплошность в металле) с минимальной эквивалентной площадью отражения, равной  $1 \text{ мм}^2$ .

4. Разработано и сконструировано оригинальное приспособление для обкатки профиля лопатки щупом, позволившее сохранить постоянный угол наклона щупа к поверхности лопатки на протяжении всего времени контроля.

5. Разработана и сконструирована электронная блок-приставка к ультразвуковому дефектоскопу УЗД-7Н, позволившая осуществить автоматическую запись результатов контроля.

6. Данный метод позволил исследовать свыше 50 дефектных сечений турбинных лопаток. При этом были выявлены все основные типы дефектов, характерные для турбинных лопаток.