
Вихретоковый контроль ступицы дисков ТВД авиационных двигателей



**Сясько
Владимир
Александрович**
Генеральный
директор, д. т. н.
Научные интересы:
контроль физико-
механических
характеристик,
микро- и нано-
структурирован-
ных материалов.



**Соломенчук
Павел
Валентинович**
Инженер.



**Вишневский
Александр
Иванович**
Ведущий
специалист –
руководитель
электромагнитной
лаборатории
ОАО «Пермский
Моторный Завод».
II уровень по
вихретоковому,
радиационному,
магнитному,
капиллярному
и ультразвуковому
контролю.

В настоящее время для контроля дисков турбин высокого давления (ТВД) на ОАО «Пермский Моторный Завод» регламентируется использование люминесцентного метода капиллярной дефектоскопии (ЛЮМ1-ОВ). Для раскрытия подповерхностных дефектов диск ТВД устанавливается на специальный стенд раскрутки, изготовленный на базе двигателей Д-20П и Д-25В, имитирующий режимы работы с максимальной частотой вращения $13000 \pm \pm 50$ об/мин при температуре, не превышающей 600 ± 30 °С.

Предварительная раскрутка приводит к радиальной вытяжке диска ТВД и раскрытию подповерхностных дефектов в ступице ТВД, после чего они могут быть обнаружены контролем ЛЮМ1-ОВ. В настоящее время осуществляется переход на новые, практически не подверженные радиальной вытяжке, материалы. Проведенные расчеты и эксперименты показали, что выявление подповерхностных дефектов возможно с использованием вихретоковой дефектоскопии подповерхностного слоя ступицы диска ТВД, представленного на рис. 1.

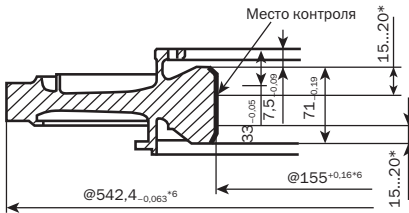


Рис. 1. Участок диска ТВД-9.93-04-201-03, подлежащий контролю

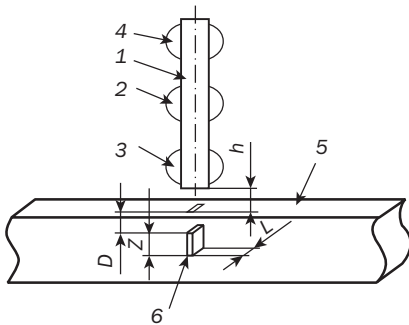


Рис. 2. Модель ВТП и ОК с подповерхностным искусственным дефектом:
1 — ферритовый стержень ВТП; 2 — обмотка возбуждения; 3, 4 — измерительная и компенсационная обмотки, включенные дифференциально; 5 — ОК; 6 — искусственный дефект

Подповерхностные дефекты, которые необходимо выявлять, имеют протяженность и глубину 0,38 мм, ширину порядка 1 мкм (рис. 2). Удельная электрическая проводимость материала диска ТВД $\sigma \approx 0,7$ МСм/м, шероховатость поверхности ступицы $Ra \approx 2,5$ мкм. В качестве средства неразрушающего контроля предлагается использовать вихретоковый дефектоскоп «КОНСТАНТА ВД1» с преобразователем ПФ-Г2-4-Тi, обладающий высокой чувствительностью [1]. Частота тока возбуждения $f = 5$ МГц. На рис. 2 изображена модель вихретокового преобразователя (ВТП) и объекта контроля (ОК) с подповерхностным искусственным дефектом, который характеризуется следующими параметрами: Z — глубина, L — протяженность, D — глубина залегания; h — зазор между ВТП и поверхностью ОК.

Для неферромагнитных металлов глубина проникновения вихревых токов $\delta = 503 / (f\sigma)^{-1/2}$. При использовании в качестве информативного параметра изменения фазы $\Delta\phi$ сигнала с выхода дифференциально включенных измерительной и компенсационной обмоток накладного ВТП сохраняется чувствительность к подповерхностным дефектам с глубиной залегания до $D = 2,5\delta = 0,675$ мм [3].

На рис. 3 изображены годографы вносимого нормированного напряжения ВТП: $\dot{U}^* = \dot{U}_{\text{ВН}} / |\dot{U}_{\text{ВН}}(P, T)|$, где P, T — рабочая точка (ВТП установлен над бездефектным участком ОК с начальным зазором $h = 0,2$ мм). Видно, что при увеличении глубины поверхностного дефекта линия 2 сперва «скользит» практически параллельно линии отвода 1, обеспечивая не только отстройку от влияния зазора, но также подавление вли-

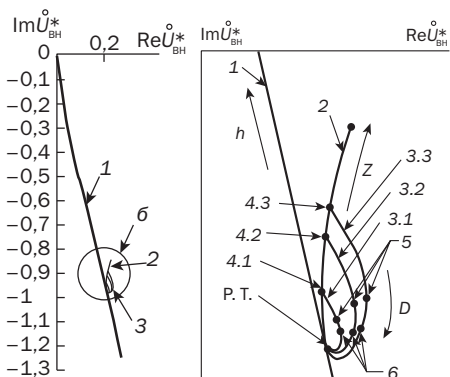


Рис. 3. Зависимость $\dot{U}^*$ от параметров поверхностного и подповерхностного дефектов и величины зазора (снизу — область б в увеличенном масштабе): 1 — линия отвода преобразователя, соответствующая увеличению h ; 2 — линия влияния глубины поверхностного дефекта; 3.1, 3.2, 3.3 — линии влияния глубины залегания подповерхностного дефекта глубиной 0,2; 0,38 и 0,5 мм соответственно; 4.1, 4.2, 4.3 — точки, соответствующие $D = 0$ мм при $Z = 0,2$ мм, 0,38 мм, 0,5 мм соответственно и $L \gg 4$ мм; 5 — точки, соответствующие $D = 0,05$ мм при $Z = 0,2$; 0,38 и 0,5 мм и $L \gg 4$ мм; 6 — точки, соответствующие $D = 0,1$ мм при $Z = 0,2$; 0,38 и 0,5 мм и $L \gg 4$ мм; Р. Т. — точка, соответствующая бездефектному участку

яния мелких дефектов и шероховатости. В случае если дефект находится под тонким слоем металла ($D \leq 0,1$ мм), то для относительно глубоких дефектов ($Z \geq 0,38$ мм) $\Delta\phi$ остается практически на прежнем уровне при девиации D в пределах от 0 до 0,1 мм (линии 3.2 и 3.3). Для мелких дефектов ($Z \leq 0,2$ мм и менее) наблюдается увеличение $\Delta\phi$ приблизительно в 2 раза (линия 3.1). При дальнейшем увеличении D , $\Delta\phi$ уменьшается до значения $\Delta\phi$ (Р. Т.) по мере уменьшения плотности вихревых токов, наведенных ВТП (точка Р. Т.)

Для подтверждения аналитических расчетов была построена модель ВТП и ОК для расчета показаний дефектоскопа в среде конечно-элементного моделирования. Вычисления производились при различных взаимных положениях ВТП и ОК, моделирующих сканирование с малым шагом области искусственного дефекта ОК. При моделировании комплексное напряжение $\dot{U}^*$ с выхода ВТП обрабатывалось в среде Excel и преобразовывалось в показания дефектоскопа — глубину трещины, мкм. При этом исследовалось влияние ширины, протяженности, глубины искусственного дефекта и глубины его залегания. На рис. 4 приведена

Расчетные показания глубины дефекта, мкм

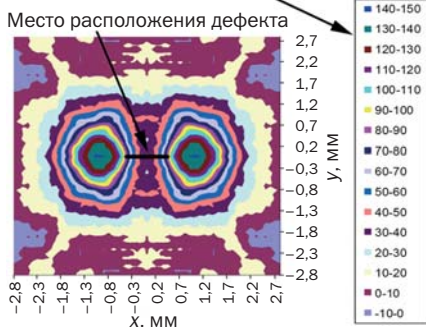


Рис. 4. Условная цветовая дефектограмма с результатами вычислений, полученных на модели ОК, содержащего поверхностный дефект с параметрами $L = 0,92$ мм, $Z = 1,0$ мм, ширина 0,12 мм

условная цветовая дефектограмма по результатам вычислений, полученных на модели ОК, содержащего поверхностный искусственный дефект со следующими параметрами: $L = 0,92$ мм, $Z = 1,0$ мм, ширина $0,12$ мм. Цветом обозначены интервалы показаний дефектоскопа, мкм. Видно, что при использовании ВТП с диаметром зоны контроля 4 мм при сканировании ОК показания дефектоскопа окажутся занижены примерно в 5 раз, однако выявляемость дефекта по прежнему будет гарантироваться.

Для подтверждения расчетов был изготовлен контрольный образец с параметрами, указанными в модели. Для этого на поверхности бруска из ковкого титанового сплава ОТ-4 (аналогичного по электромагнитным свойствам, применяемым в ТВД сплавам) методом прошивной электроэрозии была сделана прорезь, глубина которой несколько больше заданной, а ширина приблизительно $0,5$ мм (минимально возможная для используемого оборудования). Затем брусок нагревался до пластичного состояния и сжимался. После остывания ширина прорези составляла единицы микрон, что близко к заданным требованиям. Устье прорези

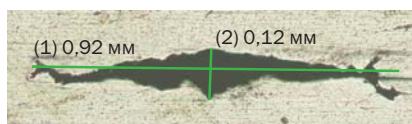


Рис. 5. Фотография искусственного дефекта при увеличении $\times 200$: 1 — протяженность дефекта; 2 — ширина дефекта

было очищено от образующихся при нагреве продуктов коррозии с помощью ультразвуковой ванны, а поверхность отшлифована [3]. Фотография искусственного дефекта при увеличении в 200 раз приведена на рис. 5.

При сканировании ОК преобразователем ПФ-Г2-4-Ті показания дефектоскопа «КОНСТАНТА ВД1» соответствовали расчетным. Это говорит о том, что конечно-элементная модель является актуальной.

Изготовление ОК с указанными выше подповерхностными дефектами с учетом доступных технологий не представилось возможным. Поэтому расчет показаний дефектоскопа производился конечно-элементным моделированием. На рис. 6 приведены результаты вычислений для подповерхностных искусственных дефектов с различными параметрами.

В табл. 1 сведены расчетные показания дефектоскопа «КОНСТАНТА ВД1» с преобразователем ПФ-Г2-4-Ті при различных L и D для искусственного дефекта глубиной $0,38$ мм и шириной $0,001$ мм, который может быть обнаружен дефектоскопом.

Модель не учитывает влияния мешающих параметров, таких как шероховатость, наклон ВТП, девиация электромагнитных свойств материала

Табл. 1. Показания дефектоскопа, мкм, с преобразователем ПФ-Г2-4-Ті при различных протяженности и глубине залегания дефекта

Протяженность искусственного дефекта, мм	Глубина залегания искусственного дефекта					
	0 мм	0,05 мм	0,1 мм	0,15 мм	0,2 мм	0,25 мм
0,5	59	77	—	—	—	—
0,6	36	52	—	—	—	—
0,8	55	49	—	—	—	—
1	72	93	65	—	—	—
1,2	79	102	69	—	—	—
1,5	106	98	91	90	—	—
2	136	163	95	74	—	—
4	265	289	231	128	84	66

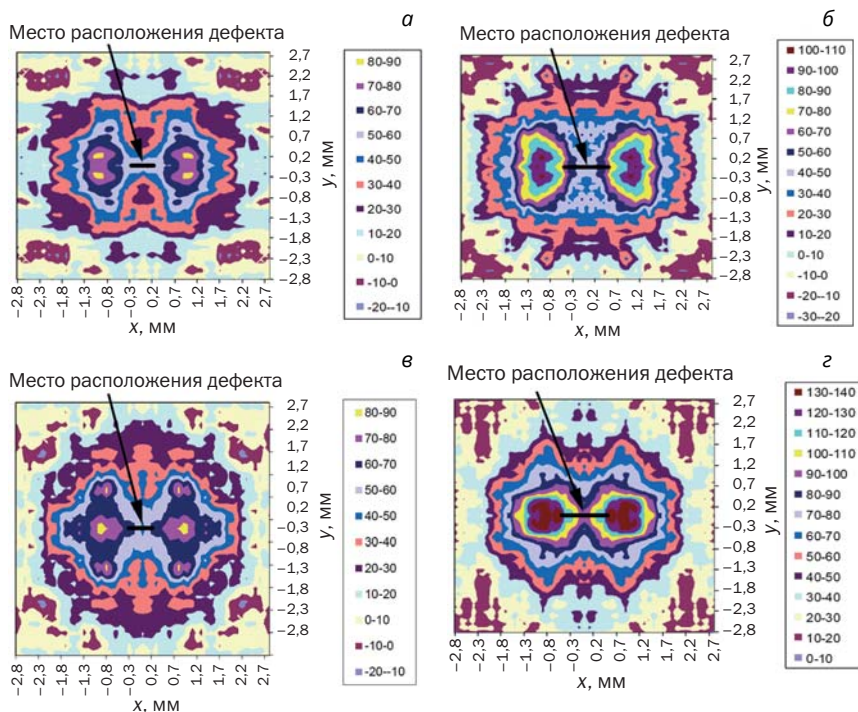


Рис. 6. Условные цветовые дефектограммы с результатами вычислений, полученных на моделях ОК с подповерхностным дефектом глубиной $Z=0,38$ мм и шириной $0,001$ мм при следующих варьируемых параметрах: а — $L=0,5$ мм, $D=0$; б — $L=1$ мм, $D=0$; в — $L=0,5$ мм, $D=0,05$ мм; г — $L=1$ мм, $D=0,1$ мм

ла ОК. Проведение вихретокового контроля ступицы ТВД предполагается после финишной обработки в лоботокарном станке. Электромагнитные свойства материала ступицы ТВД весьма однородные. В случае использования приемов стабилизации условий контроля (например, размещение ВТП в приспособлении, закрепленном в резцодержательной головке лоботокарного станка, на шпинделе которого вращается диск ТВД), влияние мешающих параметров сводится к значениям ложных показаний, не превышающих 10 мкм. Таким образом, критерием наличия дефекта могут быть показания, превышающие 30 мкм.

Применение конечно-элементного моделирования позволяет теоретически с большой достоверностью рассчитать сигналы ВТП, определить допустимые условия контроля и критерии оценки его результатов, уменьшить количество экспериментальных исследований, уменьшить количество изготавливаемых контрольных образцов, сократить стоимость и сроки поставки оборудования неразрушающего контроля.

Полученные экспериментальные и теоретические результаты показывают возможность проведения вихретокового контроля ступицы дисков ТВД для выявления подповерхностных дефектов и отказа от трудоемкой и дорогостоящей процедуры раскрутки дисков ТВД.

Литература

1. Шипша В. Г., Молодкин А. Д., Величко А. С., Михеев В. И. Вихретоковый контроль сварных соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием. — В мире НК. 2011. № 2 (52). С. 62–64.
2. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. / Научное, методическое, справочное пособие. — СПб.: Гуманистика, 2009.
3. Производственная инструкция ПИ 1.2.174–81. Выявление поверхностных дефектов в металлических материалах с помощью электромагнитных высокочастотных статических дефектоскопов. Приложение 2. / Утверждено ВИАМ, ГосНИИ ЭРАТ ГА, 1981.