



Вихретоковый контроль ступицы дисков ТВД авиационных двигателей

Рассмотрено решение задачи вихретокового контроля ступицы дисков турбины высокого давления для выявления подповерхностных дефектов. Произведен аналитический и конечно-элементный расчет показаний вихретокового дефектоскопа при сканировании объекта контроля с поверхностным и подповерхностным дефектами. Подтверждение теоретических расчетов произведено с использованием изготовленного контрольного образца. Предложены критерии оценки дефектности ступицы диска.

Submitted 24.02.15

Accepted 03.03.15

V. A. Syasko*, P. V. Solomenchuk*, A. I. Vishnevskiy**

Aircraft-Engines. Eddy Current Testing of High Pressure Turbine Disc Hub

At OAO «Permskiy Motorny Zavod» («Perm Engine Company») the technological need for eddy current testing of subsurface layer of high-pressure turbine (HPT) disc hub has arisen. Parameters of target defects: the length and depth are 0.38 mm each, the width is about 1 μm . The flaw detector «CONSTANTA VD1» with the probe PF-G2-4-Ti is offered to use as an inspection instrument. The maximum depth of defect location at which a defect can be detected by the flaw detector is analytically calculated and equal 0.675 mm. Eddy current probe (ECP) impedance plain signals are analyzed. The main dependences of ECP signals on parameters of extended subsurface defects are defined.

The finite element model of the probe and the test object containing a surface defect of finite length is made. Also the colour defectogram is made. For confirmation of theoretical calculations the reference test piece has been made, the technology of its manufacturing is described. The reference test piece was scanned by the probe PF-G2-4-Ti; the indications of the flaw detector «CONSTANTA VD1» matched the calculated value, which confirms relevance of the model.

The finite element model of the probe and the test object containing subsurface defect of finite length is made. The influence of the defect length and location depth on the ECP signals has been researched; calculated indications of the flaw detector are provided. The testing method of a HPT disc hub when ECT is fixed on a cutter-hold head of a T-lather which rotates HPT disc is offered. Testing has been carried out after the hub is being finally finished. Based on the simulation results and experimental researches the criterion of the defect existence is offered – 30 μm indication of the flaw detector. Application of finite element modelling enable reference test pieces quantity and experimental researches to be reduced as well as the cost and delivery time of NDT equipment.

Keywords: eddy current testing, subsurface defect, high pressure turbine disc, finite element modelling

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 ± 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 подвержен-

ные 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.

Подповерхностные дефекты, которые необходимо выявлять, имеют протяженность и глубину 0,38 мм, ширину по-

СЯСЬКО
Владимир
Александрович



Генеральный директор
ООО «КОНСТАНТА»
(Санкт-Петербург), д. т. н.
Научные интересы:
контроль физико-механических характеристик,
микро- и наноструктурированных материалов.

СОЛОМЕНЧУК
Павел Валентинович



Ведущий специалист, начальник сектора приборов электромагнитного контроля ООО «КОНСТАНТА» (Санкт-Петербург), к. т. н.

ВИШНЕВСКИЙ
Александр Иванович



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

* CONSTANTA Ltd, St. Petersburg, Russia

** OJSC "Perm Engine Company", Perm, Russia

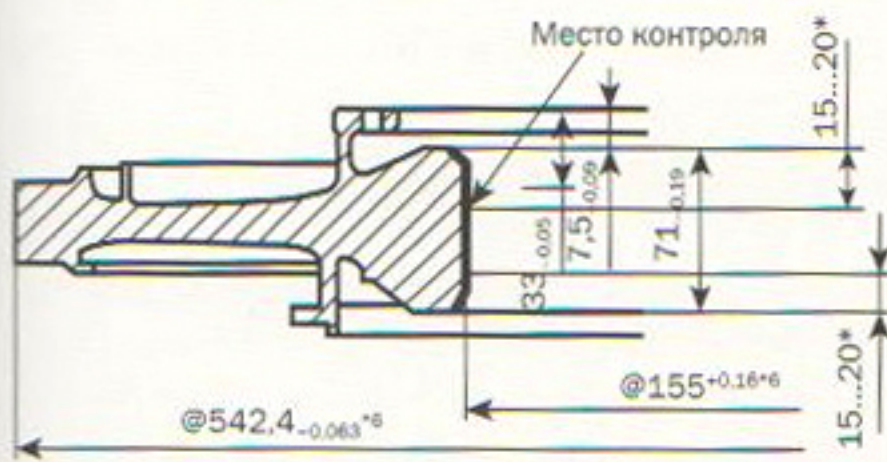


Рис. 1. Участок диска ТВД-9.93-04-201-03, подлежащий контролю

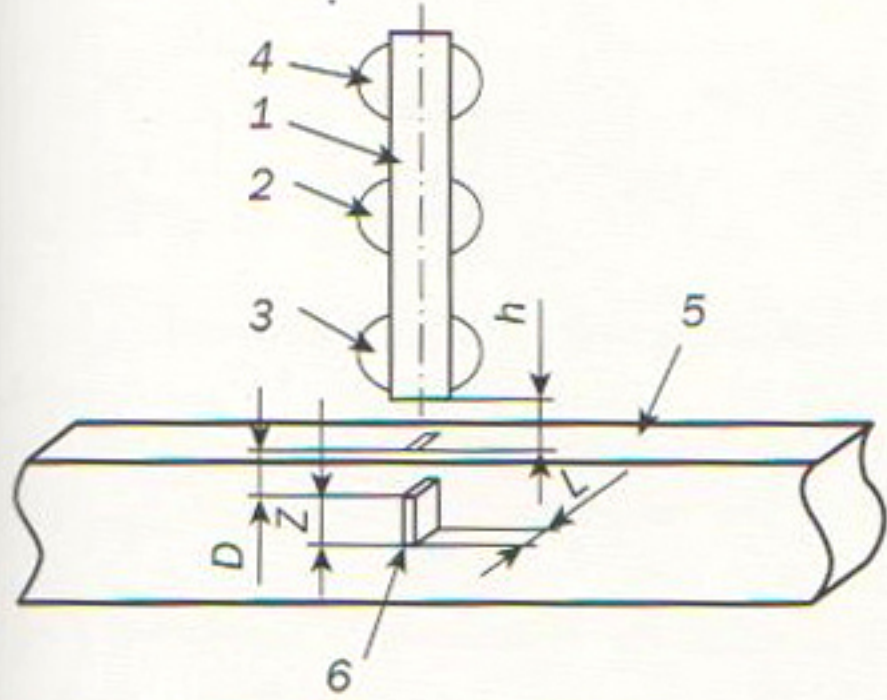


Рис. 2. Модель ВТП и ОК с подповерхностным искусственным дефектом: 1 — ферритовый стержень ВТП; 2 — обмотка возбуждения; 3, 4 — измерительная и компенсационная обмотки, включенные дифференциально; 5 — ОК; 6 — искусственный дефект

рядка 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-Т1, 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 ферромагнитных 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: $\dot{U}^* = \dot{U}_{вн} / |\dot{U}_{вн}|$ (Р. Т.), где Р. Т. — рабочая точка (ВТП установлен над бездефектным участком ОК с начальным зазором $h = 0,2$ мм). Видно,

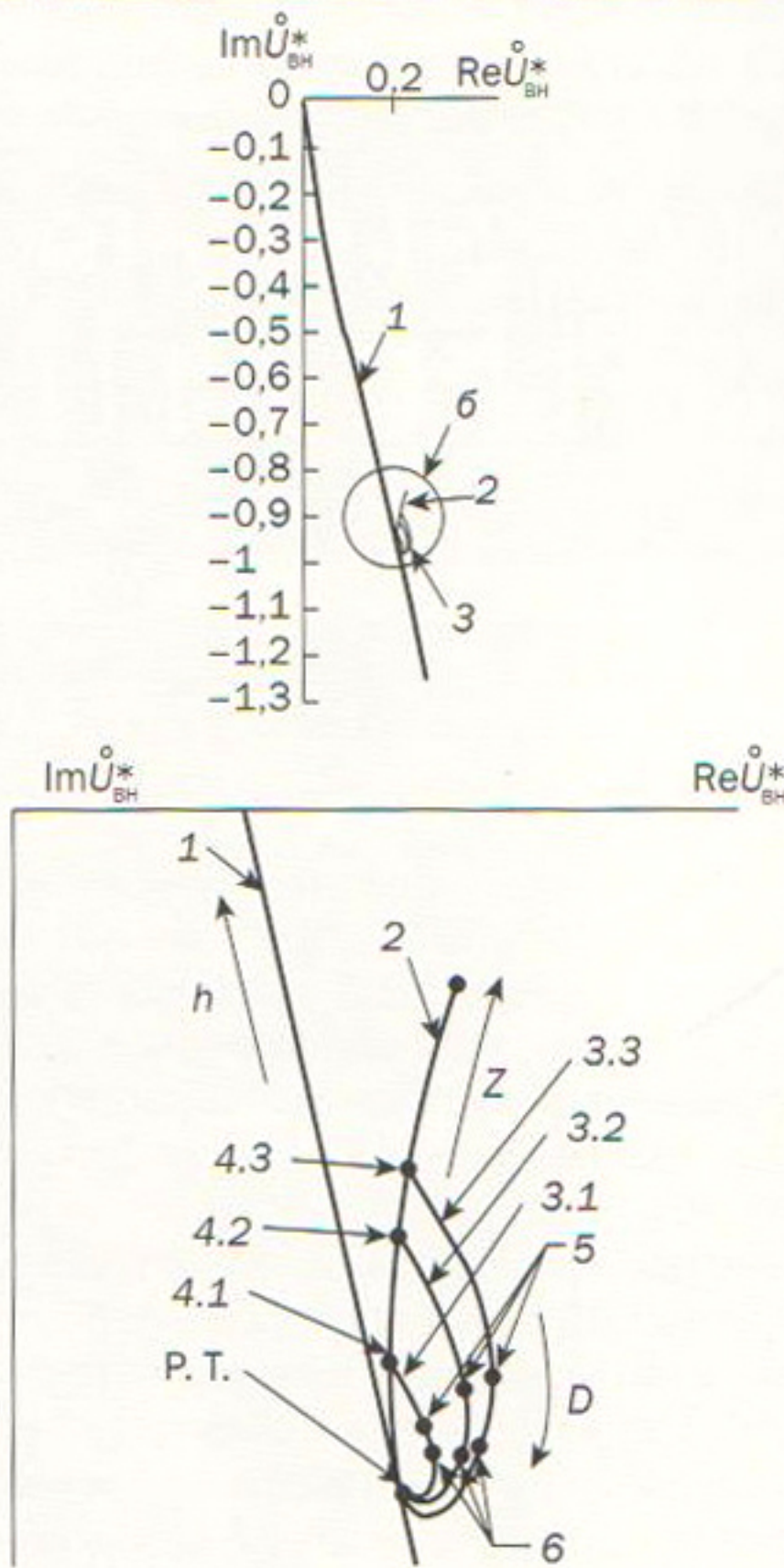


Рис. 3. Зависимость \dot{U}^* от параметров поверхностного и подповерхностного дефектов и величины зазора (снизу — область б в увеличенном масштабе): 1 — линия отвода преобразователя, соответствующая увеличению h ; 2 — линия влияния глубины поверхностного дефекта; 3.1, 3.2, 3.3 — линии влияния глубины 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

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 влияния 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 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.

Расчетные показания глубины дефекта, мкм

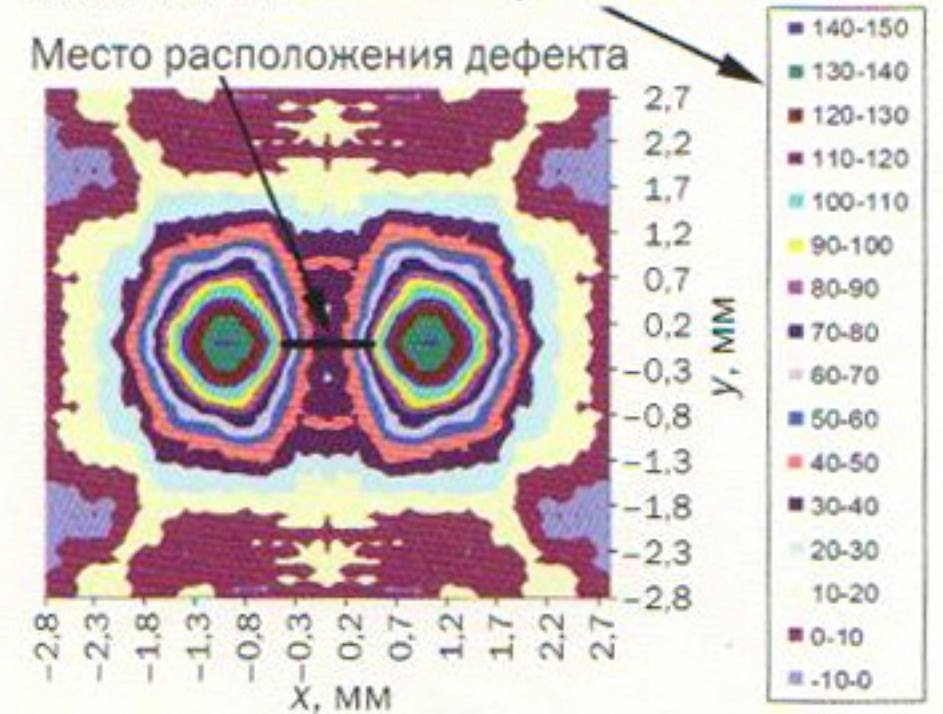


Рис. 4. Условная цветовая дефектограмма с результатами вычислений, полученных на модели ОК, содержащего поверхностный дефект с параметрами $L = 0,92$ мм, $Z = 1,0$ мм, ширина 0,12 мм

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 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.

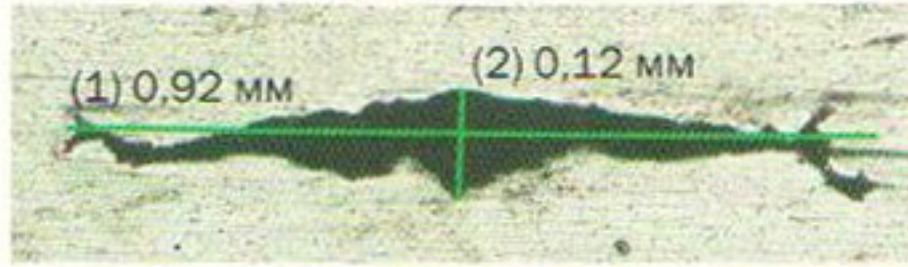


Рис. 5. Фотография искусственного дефекта при увеличении $\times 200$: 1 — протяженность дефекта; 2 — ширина дефекта

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.

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

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

References

1. Shipsha V.G., Molodkin A.D., Velichko A.S., Mikheev V.I. V mire NK [NDT World]. 2011, no. 2 (52), pp. 62–64 (in Russ.).
2. Potapov A.I., Syasko V.A. Nerazrushayushchie metody i sredstva kontrolya tolshchiny pokrytiy i izdeliy [Non-Destructive Technologies and Apparatus for Inspection of Coating Thickness and Production]. St-Petersburg, Gumanistica, 2009 (in Russ.).
3. PI 1.2. 174–81. Proizvodstvennaya instruktsiya Vyavlenie poverhnostnykh defektov v metallicheskikh materialah s pomoshchyu elektromagnitnykh vysokochastotnykh staticheskikh defektoskopov [Working Instruction PI 1.2. 174–81. Detection of superficial defects in metal materials by means of electromagnetic high-frequency static defectoscopes]. Moscow, VIAM, 1981 (in Russ.).

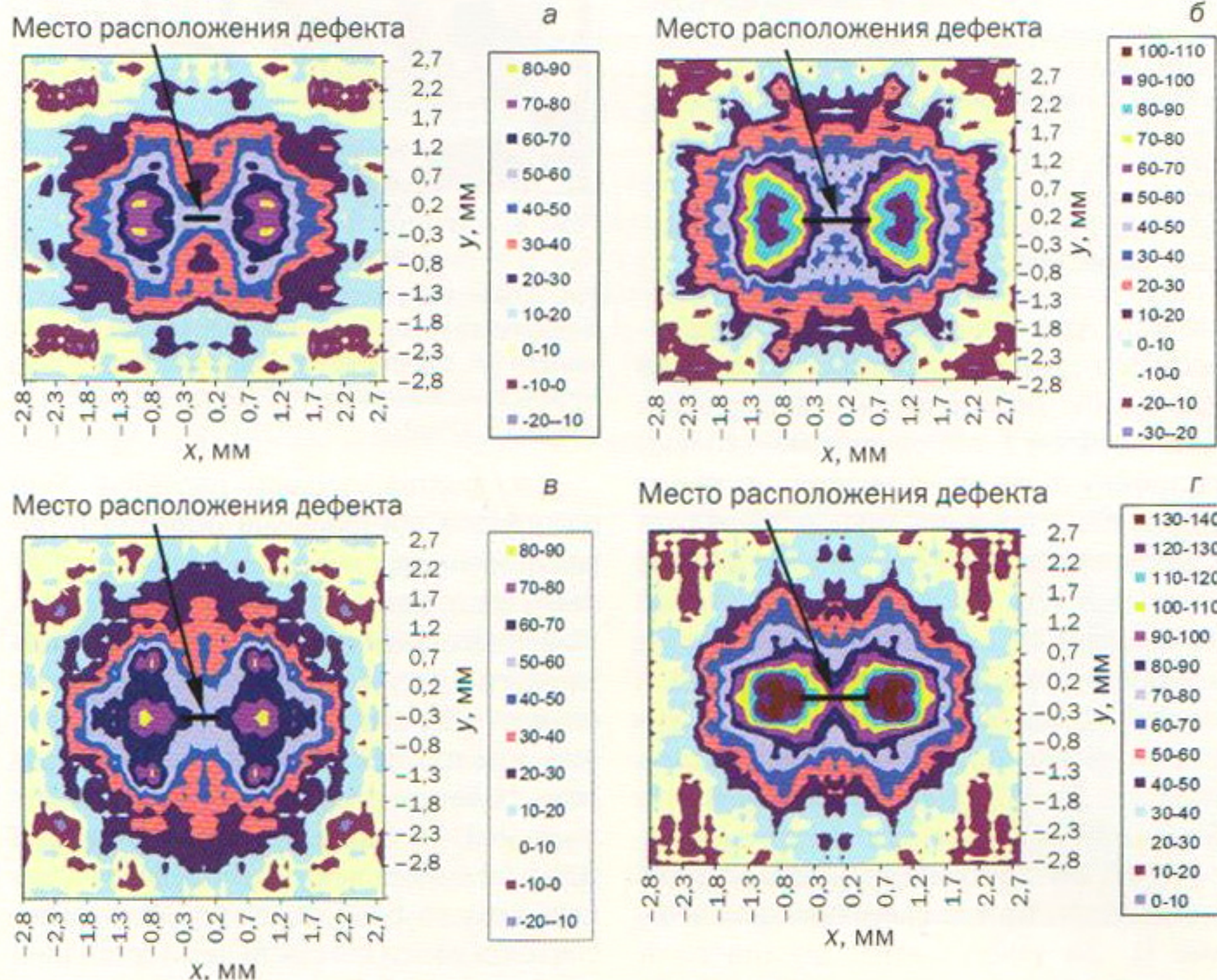


Рис. 6. Условные цветные дефектограммы с результатами вычислений, полученных на моделях ОК с подповерхностным дефектом глубиной $Z = 0,38$ мм и шириной 0,001 мм при следующих варьируемых параметрах: а — $L = 0,5$ мм, $D = 0$; б — $L = 1$ мм, $D = 0$; в — $L = 0,5$ мм, $D = 0,05$ мм; г — $L = 1$ мм, $D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

Статья получена 24 февраля 2015 г., в окончательной редакции — 3 марта