ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО СТАНДАРТАМ

ВНИИНМАШ

РАСЧЕТЫ
И ИСПЫТАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ

МЕТОДЫ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКОЙ ФРАКТОГРАФИИ

Р 50-54-22-87

gost.e-ecolog.ru

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ

(Госстандарт СССР)

Всесоюзный научно-исследовательский институт по
нормализации в машиностроении
(ВНИИНМАШ)

Утверждены
Приказом ВНИИНМАШ
№ 263 от 27 августа
1987 г.

Расчеты и испытания на прочность.
Методы стереоскопической фрактографии

Р е к о м е н д а ц и и

Р 50-54-22-87

Москва, 1987

УДК 620.184.6:528.721.22 Группа В 09

Р Е К О М Е Н Д А Ц И И

Расчеты и испытания на прочность. Р 50-54-22-87
Методы стереоскопической фрактографии

ОКСТУ 4109

Рекомендации (Р) регламентируют требования к проведению стереофрактографического анализа поверхности разрушения.

Р распространяются на изломы твердых тел и устанавливают единые требования к методам исследования микромеханизмов разрушения посредством качественных и количественных оценок рельефа поверхности при стереоскопическом наблюдении.

Р рассчитаны на работников научно-исследовательских институтов, опытно-конструкторских бюро и заводских лабораторий.

I. Общие положения.

I.I. Назначение и область применения.

I.I.I. Настоящие Р предназначены для количественного определения геометрических параметров рельефа поверхности разрушения и регламентируют методы исследования объектов, подлежащих и поддающихся наблюдению и фотографированию в световых и электронных микроскопах, с привлечением аппарата фотограмметрии.

I.I.2. Р устанавливают единые требования к проведению стереофрактографического анализа поверхности разрушения: получению стереопар, определению третьей координаты для построения в дальнейшем на основе результатов обмера стереопар геометрической модели рельефа поверхности разрушения.

I.2. Основные понятия.

I.2.I. Фрактография стереоскопическая (стереофрактография) - метод изучения микромеханизмов разрушения материалов по строению поверхности излома в пространственном отображении.

I.2.2. Фотограмметрия - дисциплина, занимающаяся определением формы, размеров и взаимного расположения различных объектов по измерениям их положений на фотоснимках.

I.2.3. Стереопара - сочетание двух изображений одного объекта, полученных фотосъемкой с двух различных точек наблюдения.

I.2.4. Стереомодель - объемная модель, получаемая при стереонаблюдении объекта либо стереопар.

I.2.5. Параллакс - разность координат изображения одной и

той же точки на снимках стереопары, в системе координат объекта.

$$P_x = X_0 - X_1 \text{ (см.п.I.3)},$$

Ось X расположена в нормальной к оптической оси прибора плоскости, перпендикулярна оси поворота при съемке стереопар способом наклона образца (см.п.3.2) и параллельна направлению смещения при съемке способом плоско-параллельного смещения (см.п.3.3).

I.2.6. Стереоскоп, стереокомпаратор, стереопланиметр, стереограф и др. - бинокулярные оптические приборы для индивидуального наблюдения стереопар, качественной и количественной оценки рельефа поверхности разрушения.

I.2.7. Превышение - разность высот выбранных точек поверхности разрушения.

1.3. Принятые обозначения:

θ - разность углов наклона объекта при съемке стереопары, угол конвергенции, град ;

Δh - превышение, мм ;

P - параллакс, мм ;

ΔP - разность параллаксов выбранных двух точек объекта, мм ;

M - кратность увеличения изображений, составляющих стереопару, крат ;

b - смещение объекта в плоскости, перпендикулярной оптической оси прибора, мм ;

H - рабочее расстояние, мм ;

Φ - кратность фотографического увеличения стереопары, крат ;

$x_0 y_0$ - координаты выбранной точки на базовом снимке стереопары (см.3.2.1 и 3.3.I), мм ;

$x_1 y_1$ - то же, на втором снимке стереопары (см.3.2.2 и 3.3.2),мм.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОВЕДЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Образцы и оборудование.

2.1.1. Качественный и количественный анализ методом стерео-

фрактографии проводят на чистых изломах образцов или деталей, либо на отпечатках-репликах с этих изломов.

2.1.2. Для получения стереоскопических пар используют растровые (РЭМ), просвечивающие электронные (ПЭМ) или световые (СМ) микроскопы.

2.1.3. Наблюдение, а также качественный и количественный анализ стереомодели производят с помощью специальных приборов (см.1.2.6). Допускается количественный анализ стереопар без специальных приборов - см.настоящие Р, п.4.2, Приложение .

2.2. Подготовка образцов для исследования.

2.2.1. Подготовка образцов для исследования проводится в соответствии с рекомендациями "Расчет и испытания на прочность в машиностроении. Методы исследования изломов металлов" [14].

2.3. Порядок проведения исследования.

Для фрактографического анализа рекомендуется следующая последовательность операций:

2.3.1. визуальный осмотр поверхности разрушения;

2.3.2 наблюдение с помощью лупы или бинокулярного микроскопа с малым увеличением (до 10-15 крат);

2.3.3. наблюдение с помощью бинокулярного микроскопа с постепенно нарастающим повышением кратности увеличения, чтобы получить представление о макрорельефе поверхности разрушения и установить взаимное расположение его характерных областей для последующего анализа стереомодели исследуемого микроучастка с высокой кратностью увеличения;

2.3.4. проведение стереосъемки выбранного участка поверхности разрушения.

3. ПОЛУЧЕНИЕ СТЕРЕОПАР

Рекомендуется получение стереопар способом наклона или методом плоско-параллельного смещения образца. Допускается

использование и других способов.

3.I. Общие требования к съемке стереопар.

3.I.I. При съемке стереопар в РЭМ растр электронного микроскопа рекомендуется ориентировать таким способом, чтобы одна из сторон кадра была параллельна оси наклона.

3.I.2. Во время съемки стереопары (при изменении угла наклона) не допускается перефокусировка изменением тока линз. Перефокусировка производится только перемещением образца вдоль оптической оси микроскопа.

3.I.3. При съемке стереопар способом плоско-параллельного смещения последнее рекомендуется задавать параллельно стороне кадра.

3.I.4. Необходимо, чтобы все стороны кадрирующей рамки прибора имели четко обозначаемые выступы или впадины для облегчения последующего ориентирования каждого из снимков стереопары с минимальным взаимным перекосом.

3.2. Съемка способом наклона образца.

3.2.I. После выбора объекта и ракурса съемки выполнить первый (базовый) снимок в положении θ =0 либо $\theta/2$.

3.2.2. Наклонить объект по отношению к исходному положению относительно оси X на угол конвергенции (см.п.I.2.5). Величина и знак θ зависят от конкретных условий съемки. На практике этот угол обычно выбирают от 5° до $I5^{\circ}$, но возможны и другие его значения (см. Приложение).

3.2.3. Не изменяя токи линз и величину сигнала, сфокусировать (см.п.3.I.2) и выставить в прежнее положение изображение горизонтальным смещением образца.

3.2.4. Выполнить второй снимок стеропары.

3.3. Съемка способом плоско-параллельного смещения образца.

3.3.1. После выбора объекта и ракурса съемки выполнить первый (базовый) снимок.

3.3.2. Задать объекту некоторое горизонтальное смещение (см.п.3.1.3), величина которого определяется экспериментально и должна обеспечить необходимый стереоэффект.

3.3.3. Выполнить второй снимок стереопары.

4. АНАЛИЗ СТЕРЕОПАР

Для получения прямого стереоэффекта при съемке методом наклона кадр, снятый под меньшим углом наклона относительно горизонтальной плоскости, устанавливают для просмотра левым глазом, а под большим углом - для просмотра правым глазом. При этом ось наклона образца должна проходить перпендикулярно линии базиса (линии, соединяющей зрачки наблюдателя).

При анализе стереопар, полученных плоско-параллельным смещением, стереопары следует располагать перекрытием внутрь, то есть перекрывающиеся части снимков должны быть расположены навстречу друг другу.

4.1. Для анализа стереоизображения применяются приборы различных типов. Количественный анализ с построением рельефа поверхности эффективно выполнять с привлечением автоматизированных стереокомпараторов. Допускается производить подобный анализ и без специальной аппаратуры (см. Приложение).

4.1.1. В случае съемки стереопар способом наклона превышения на стереомодели поверхности разрушения определяют по формулам (полученным в приближении ортогонального проектирования):

$$\Delta h = \frac{\Delta P_x}{2M \sin \theta/2}, \text{ при наклоне } \pm\theta/2, \qquad (1)$$

$$\Delta h = \frac{X_0 \cos\theta - X_1}{M \sin\theta}, \text{ при наклоне } 0^\circ \ldots \theta. \qquad (2)$$

4.I.2. При съемке стереопар методом плоско-параллельного смещения объекта превышение определяется по формуле:

$$\Delta h = \frac{\Delta P_x}{b + \Delta P} \cdot H \text{ , при } P_y = const \qquad (3)$$

4.I.3. Допустимо измерение параллаксов прямыми раздельными измерениями расстояний между тождественными заданными точками стереопар с применением любых способов измерений. Использование несложных приспособлений (см., например, Приложение настоящих Р) упрощает процесс измерений, но увеличивает их инструментальную погрешность.

4.I.4. Измерения рекомендуется проводить на негативах стереопары.

4.I.5. Негативы устанавливают на предметных стеклах измерительного прибора с минимальным перекосом их координатных осей, связанных с микроскопом.

5. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

5.I. Суммарная инструментальная погрешность измерений включает: 5.I.I погрешности определения кратности увеличения изображения на стереопарах;

5.I.2 погрешность определения угла наклона Θ^0, составляющую 0,5 цены деления лимба гониометра прибора;

5.I.3 погрешности определения величины сдвига при съемке стереопар плоско-параллельным смещением;

5.I.4 погрешности определения положения проекции оси наклона на каждом изображении, составляющем стереопару;

5.I.5 погрешность за счет усадки подложки фотоэмульсии;

5.I.6 погрешности определения фотоувеличения позитива стереопары;

5.I.7 погрешность измерения параллакса, составляющую 0,5 цены деления измерительного прибора;

5.I.8 погрешность, возникающую при непараллельности координатных осей негативов, составляющих стереопару, расположенных на предметных стеклах измерительного прибора

$$\delta_{\Delta P} = \sqrt{\Delta P^2 + \beta^2 (\Delta P L)^2},$$

где β – угол перекоса координатных осей снимков, рад;

L – расстояние между точками стереомодели, для которых рассчитывают превышения;

5.I.9 погрешность определения рабочего расстояния H;

5.I.I0 погрешность, связанную с искажением изображения в РЭМ.

5.2. Калибровку увеличения рекомендуется производить съемкой объектмикрометра или иного тест-объекта при том же рабочем расстоянии, при котором осуществляется съемка образца.

5.3. Для обеспечения достаточной точности приближения ортогонального проектирования съемку стереопар методом наклона рекомендуется производить при использовании РЭМ с соблюдением соотношения $M:H \geqslant 5.10^{3}$мм, а при использовании ПЭМ – для увеличений свыше 500. Метод плоско-параллельного сдвига применяется для увеличений ниже 500 крат.

5.4. Уточненный расчет параметров стереомодели с учетом фактического построения изображения по законам центральной проекции следует осуществлять по рекомендациям, содержащимся в прилагаемом списке литературы.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

I. Измерение стереопар без применения стереокомпараторов расширяет доступность метода стереоизмерений. Использование несложных приспособлений упрощает процесс измерений и позволяет проводить их с высокой производительностью и без дополнительных вычислений. При этом для создания параллаксов значительной величины, которые могли бы быть измерены без специальной аппаратуры с удовлетворительной точностью, допускается использование углов конвергенции, превышающих 15^0.

Ниже приводится метод обсчета стереопар, получаемых съемкой способом наклона.

Рекомендуется использовать углы $14{,}5^0$, $19{,}5^0$ и 30^0 при наклоне $0^0 - \theta$ ($14{,}4^0$; $19{,}2^0$; 29^0 при наклоне $\pm\ \theta/2$) поскольку значения $\sin^{-1}\theta\left(\frac{1}{2}\sin^{-1}\theta/2\right)$ для них равны 4, 3 и 2. Для уменьшения погрешности используется наибольшее значение угла, при котором еще не происходит перекрытия изображений интересующих деталей.

I.I. Проведение измерений.

I.2. На стереопаре выбирается реперная точка, относительно которой будут измеряться превышения остальных точек. В качестве реперной удобно выбрать крайнюю левую или правую точку, т.к. в этом случае не будет изменяться знак в расчетной формуле (вертикальная ось фотографии совпадает с направлением оси наклона).

I.3. Фотоотпечатки изготовляются с фотографическим увеличением 2 и более для уменьшения погрешности линейных измерений.

I.4. Измеряются с погрешностью не более 0,5мм проекции на горизонтальную ось фотографий расстояний от реперной точки до других точек. Таким образом, при фотографическом увеличении 2 фактическая точность измерения будет не ниже 0,25мм. По расчетным формулам определяется превышение.

I.5. Непосредственно измеряются превышения (без дополнительных расчетов) с использованием кульмана.

I.5.I. При использовании расчетной формулы (I) фотографии стереопары изготовляются с фотографическим увеличением 2 и более крат.

При использовании формулы (2) фотографии изготовляются с неодинаковым увеличением: фотография образца с наклоном θ - с фотографическим увеличением Φ=2 и более, фотография с нулевым наклоном - с увеличением $\Phi \cdot \cos\theta$.

I.5.2. Фотографии крепятся на доску кульмана таким образом, чтобы направление оси наклона совпадало с вертикалью кульмана, при этом реперные точки на обеих фотографиях должны лежать на одной вертикали. Фотографии должны лежать так же, как расположено поле зрения относительно детектора электронов (не повернуты на 180^{0}), т.е. не должны меняться левая и правая стороны относительно оси наклона.

I.5.3. Проводятся вертикали через изображения точки на фотографиях стереопары, превышение которой относительно реперной точки определяется.

I.5.4. Если реперная точка лежит слева от измеряемой и ближе к ней лежит вертикаль точки на фотографии с наклоном 0^{0} или $\theta/2$, то определяемое превышение имеет знак плюс, т.е. определяемая точка лежит выше реперной. Если ближе к реперной точке лежит вертикаль, проведенная на фотографии с наклоном 0^{0} или $+\theta/2$, то искомое превышение имеет знак минус. Если реперная точка лежит справа, то знаки меняются.

I.5.5. Измеряется расстояние между проведенными вертикалями в мм. Превышение определяется, исходя из масштаба, приведенного в таблице I. Масштаб показывает, какая высота в мкм соответствует делению линейки в I мм. Таблица составлена для фотографического

увеличения Ф = 2, масштаб изменяется обратно пропорционально Ф.

Таблица I

Угол наклона	Увеличение М			
	250	500	I000	I0000
I4,5°(I4,4°)	8	4	2	0,2
I9,5°(I9,2°)	6	3	I,5	0,I5
30° (29°)	4	2	I	0,I

I.5.6. Пример. Измерение глубины отпечатка твердости. В качестве реперной точки выбран левый угол отпечатка. Схема крепления фотографий и измерения приведена в приложении на рис.I. Ближе к реперной точке расположена вертикаль точки на фотографии с углом θ, следовательно, измеряемая точка расположена ниже реперной, т.е. превышение имеет знак минус. Расстояние между вертикалями - I2мм. Учитывая, что при М = I000, Ф = 2, θ= I9.5° одному миллиметру соответствует I,5 мкм (см.табл.),превышение равно I8 мм.

I.6. Проведение измерения в соответствии с п.I.5.4 значительно ускоряется при использовании специальной линейки, крепящейся на кульман.

Линейка изготавливается из оргстекла. Ее высота Н (рис.2) определяется максимально применяемым фотографическим увеличением, и должна превышать на 5÷ 8 см размер фотографии при этом увеличении.

На обратной стороне линейки наносится штриховая вертикальная черта и перпендикулярно к ней наклеиваются шкалы. Шкалы можно изготовить из миллиметровой бумаги, нанеся на нее соответствующие обозначения. На одну линейку можно наклеить несколько узких шкал для разных углов и увеличений с промежутками между ними I5 мм.

Каждая из шкал отградуирована в единицах превышения для соответствующего угла конвергенции или заданного плоско-параллельного смещения.

Освоение методик стереоизмерений полезно начинать с измерений объектов известной геометрической формы и размеров, например, отпечатков алмазных пирамид, полученных при измерении твердости. Особое внимание следует обращать на знаки высот.

I.7. Проведение измерений с использованием специальной линейки.

I.7.I. Выполняются требования пп. I.5.I - I.5.2.

I.7.2. Вертикальная черта линейки совмещается с измеряемой точкой на фотографии с наклоном θ так, чтобы тонкая сплошная линия в центре линейки была строго параллельна оси наклона гониометра микроскопа или строго нормальна направлению плоско-параллельного смещения, и в то же время проходила через одноименные реперные точки стереопары, шкала подводится к той же точке на фотографии с наклоном 0°.

I.7.3. На шкале считывается величина и знак высоты.

2. На рис. 2 изображена линейка для $\Phi = 2$, $M = 1000, 5000,$ $=14{,}5^{\circ}$, $19{,}5^{\circ}$ и 30°. Знаки высот представлены для случая, когда реперная точка лежит справа от измеряемой. Если реперная точка лежит слева, знаки меняются. Применение этой же линейки (со шкалами для указанных углов) допустимо для измерения стереопар с наклоном $\pm \theta/2$, где углы наклона должны быть $14{,}4^{\circ}$, $19{,}2^{\circ}$, 29°. Систематическая ошибка при этом относительно невелика: 1% от измеряемой высоты при $\theta = 14{,}4^{\circ}$ и 3,5% при $\theta = 29^{\circ}$.

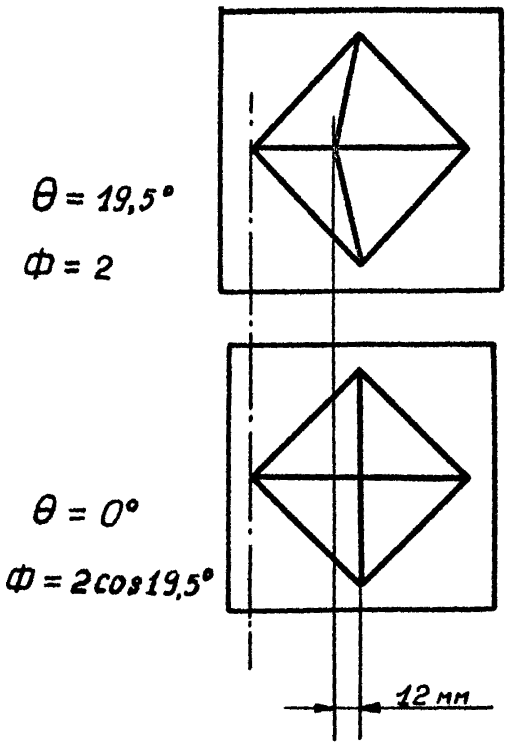

Рис. I. Схема крепления фотографий и проведения измерений на кульмане.

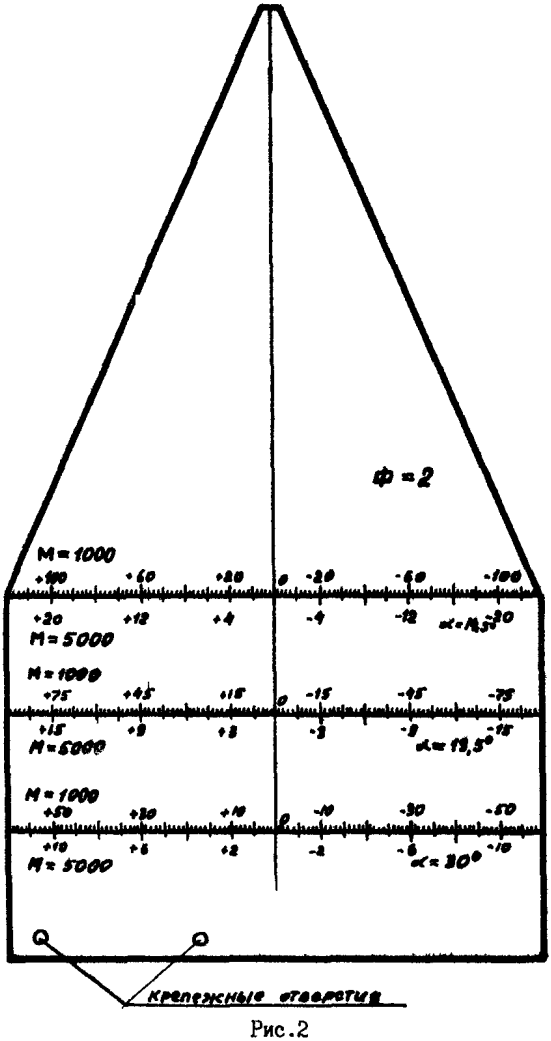

Рис.2

Линейка для кульмана для непосредственного измерения высот.

ЛИТЕРАТУРА

I. Скиридов А.С. Стереофотограмметрия. - М.: Гостехиздат, 1951.

2. Гаредик И.С. Теория обработки стереопар, полученных в электронном микроскопе. - Изв.вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1965, № 4, с.109-114.

3. Шиммель Г. Методика электронной микроскопии. - М., Мир, 1972,

4. Boyde A., Journal of Mikroscopy, 1973, 98, 452 p.

5. Бобир Н.Я., Лобанов А.Н., Федорук Г.Д. Фотограмметрия. - М.: Недра, 1974,

6. Broek D. Some contributions of electron fractography to the theory of fracture.- Inter.Met.Rev., 1974, 19, p.135-182.

7. Boyde A. Ross H.F. Photogrammetric Record, 1975, 8, 46 p.

8. Финковский В.Я., Мельник В.Н. Исследование геометрических искажений снимков, полученных на растровом электронном микроскопе. - Геодезия и картография, 1977, № 6, с.38-44.

9. Финковский В.Я., Мельник В.Н. Фотограмметрическая обработка снимков, полученных в растровом электронном микроскопе. - Там же, 1978, № 9, с.46-52.

10. Красовский А.Я., Степаненко В.А. Изучение механизма распространения трещин усталости в никеле методом количественной стереоскопической фрактографии. - Проблемы прочности, 1978, № 11, с.86-94.

11. Применение стереоскопической фрактографии для анализа сопротивления развитию трещин (В.А.Вайншток, А.Я.Красовский, Г.Н.Надеждин, В.А.Степаненко).- Проблемы прочности, 1978, № 11, с.101-108.

I2. Степаненко В.А., Растровая и трансмиссионная стереоскопическая фрактография усталостных изломов. - Проблемы прочности, 1979, № 12, с.89-91.

I3. Wilhelm S. Time - and Cost - Saving Method for the Preparation of Stereoscopic Pairs of SEM Micrographs. Practical Metallography, 1980, 17, p.554-559.

I4. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы исследования изломов металлов. Рекомендации. - М., 1980.

I5. Vztah lomove houzevnatosti a kritickeho otevreni trliny pri dynamickem zatezovani (A.J.Krasowsky, V.N. Krasiko, A.S.Stukaturova, Z.Bilek, M.Holzmann, B.V.Vlach) - Zvaranie, 31 (1982) - c.11.322-326.

I6. Фрактография и атлас фрактограмм. Справочник под ред. М.Л.Бернштейна.-М.: Металлургия, 1982.

I7. Сердюков В.М. Фотограмметрия. - М.: Вища школа, 1983.

I8. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д. и др. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ. -М.: Мир, 1984, Кн. I.

I9. Спасский М.Н., Утевский Л.М., Этеровили Т.В. - Зав.лаборатория, 1984, т.45, № 7, с.6I3-6I6.

20. Спасский М.Н. - Зав.лаборатория, 1984, т.50, № 3,с.I9-24.

2I. Крамаренко И.В. К анализу стереоизображений поверхности разрушения при стереофрактографических исследованиях. - Проблемы прочности, 1985, № 3, с.84-87.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ДАННЫЕ

I. РАЗРАБОТАНЫ Институтом проблем прочности АН УССР (головная организация-разработчик), Всесоюзным научно-исследовательским институтом по нормализации в машиностроении, Киевским политехническим институтом, Физико-механическим институтом АН УССР, Центральным научно-исследовательским институтом черной металлургии им. Бардина, Всесоюзным научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта.

Исполнители: д.ф.-м.н. А.Я.Красовский, И.В.Крамаренко, чл.-корр. АН УССР О.Н.Романив, к.т.н. Л.П.Гранкова, В.М.Дусевич, к.т.н. Ю.В.Зима, к.т.н. М.Н.Спасский, к.т.н. В.А.Степаненко, д.т.н. Е.А.Шур.

2. Одобрены научно-методической комиссией по стандартизации в области фрактографии секции "Расчеты и испытания на прочность" НТС Госстандарта СССР.

3. Утверждены Приказом ВНИИНМАШ Госстандарта СССР № 263 от 27.08.87 г.

4. Введены впервые.

Содержание

Стр.

I. Общие положения 3
2. Требования к проведению исследований..... 4
3. Получение стереопар 5
4. Анализ стереопар 7
5. Погрешность измерений 8
Приложение I0
Литература I6
Информационные данные I8

Расчеты и испытания на прочность. Методы стереоскопической фрактографии

Рекомендации Р 50-54-22-87

Редактор Трайнин А.И.

Мл. редактор Еремеева Т.В.

ВНИИНМАШ Госстандарта СССР

Ротапринт ВНИИНМАШ I23007, Москва, ул. Шеногина, 4

Тираж 312экз. Объем 0,7 уч.-изд.л. Заказ № 4009-87-I

gost.e-ecolog.ru