|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО**    **ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ** | | |
|  | **НАЦИОНАЛЬНЫЙ**  **СТАНДАРТ**  **РОССИЙСКОЙ**  **ФЕДЕРАЦИИ** | **ГОСТ Р**  (*проект, 1-ая редакция*) |

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Определение остаточных напряжений в изделиях методом сверления отверстия**

**(ASTM E837-2020, NEQ)**

**Настоящий проект стандарта не подлежит применению до его утверждения**

**Москва**

**Российский институт стандартизации 202\_**

**Предисловие**

**ГОСТ Р**

***(проект, 1-ая редакция)***

1. РАЗРАБОТАН Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» национального исследовательского центра «Курчатовский институт»
2. ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 182 «Аддитивное производство»
3. УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 201\_\_ г. № \_\_\_\_\_\_\_\_
4. Настоящий стандарт разработан с учетом основных нормативных положений международного стандарта ASTM E837-2020 «Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling StrainGage Method».

*Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0-2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в годовом (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе "Национальные стандарты", а официальный текст изменений и поправок - в ежемесячно издаваемом информационном указателе "Национальные стандарты". В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя "Национальные стандарты". Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования - на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет (www.rst.gov.ru).*

© Оформление. ФГБУ «РСТ», 20\_\_

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

**Содержание**

**ГОСТ Р**

***(проект, 1-ая редакция)***

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | Область применения………………………………………………………………. | | 5 |
| 2 | Нормативные ссылки……………………………………………………………… | | 5 |
| 3 | Термины и определения …………………………………………………………. | | 6 |
| 4 | Обозначения………………………………………………………………………… | | 7 |
| 5 | Сущность метода…………………………………………………………………... | | 9 |
| 6 | Образцы для испытаний………………………………………………………….. | | 9 |
| 7 | Оборудование для испытаний…………………………………………………… | | 10 |
| 8 | Подготовка к проведению испытаний…………………………………………... | | 12 |
| 8.1 | Подготовка к измерениям деформаций с помощью тензодатчиков……..… | | 12 |
| 8.2 | Подготовка к измерениям перемещений с помощью оптической системы корреляции цифровых изображений…………………………………………… | | 14 |
| 9 | Проведение испытаний…………………………………………………………… | | 16 |
| 10 | Обработка результатов…………………………………………………………… | | 17 |
| 10.1 | Определение остаточных напряжений по измерениям деформаций, полученных с помощью тензодатчиков……………………………………….... | | 17 |
| 10.2 | Определение остаточных напряжений по измерениям перемещений, полученных с помощью оптической системы корреляции цифровых изображений…………………………………………………………………………. | | 20 |
| 11 | Протокол испытаний……………………………………………………………….. | | 23 |
| Приложение А.1 | | (справочное) Определение калибровочных коэффициентов для однородных по глубине остаточных напряжений в «тонкостенных» исследуемых объектах …...……………………. | 24 |
| Приложение А.2 | | (справочное) Определение калибровочных коэффициентов для однородных по глубине остаточных напряжений в «массивных» исследуемых объектах ……………………………. | 25 |
| Приложение А.3 | | (справочное) Определение калибровочных коэффициентов для однородных по глубине остаточных напряжений в исследуемых объектах «переходной толщины» ……………….. | 26 |
| Приложение А.4 | | (справочное) Определение калибровочных коэффициентов для неоднородных по глубине остаточных напряжений в «массивных» исследуемых объектах ………………………….. | 28 |
| Приложение А.5 | | (справочное) Определение калибровочных коэффициентов для неоднородных по глубине остаточных напряжений в «тонкостенных» исследуемых объектах……………………….. | 30 |
| Приложение А.6 | | (справочное) Определение калибровочных коэффициентов для неоднородных по глубине остаточных напряжений в исследуемых объектах «переходной толщины» …………….. | 31 |
| Приложение Б | | (обязательное) Значения констант для определения однородных остаточных напряжений в «переходной толщины» и «массивных» исследуемых объектах……………... | 33 |
| Приложение В | | (обязательное) Значения констант для определения неоднородных остаточных напряжений в «переходной толщины» и «массивных» исследуемых объектах…………...... | 36 |
| Приложение Г | | (обязательное) Определение значений поправочных коэффициентов А, В, C, F, G для заданного шага сверления методом конечных элементов……………………………………… | 42 |

|  |
| --- |
| **НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ** |
| **АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИи**  **Определение остаточных напряжений в изделиях методом сверления отверстия**  Additives processes. Determining residual stresses by the hole-drilling method |

**Дата введения — 202 — —**

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на конструкционные изотропные или квазиизотропные линейно-упругие металлические и неметаллические материалы, изготовленные по аддитивным технологиям.

Настоящий стандарт может быть также применен для указанных материалов, изготовленных по другим технологиям.

Настоящий стандарт устанавливает метод определения однородных и неоднородных по глубине остаточных напряжений по измерению поверхностных перемещений или деформаций в области сверления отверстия.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 8074 Микроскопы инструментальные. Типы, основные параметры и размеры. Технические требования

ГОСТ 20420-75 Тензорезисторы. Термины и определения

ГОСТ 21616 Тензорезисторы. Общие технические условия

ГОСТ Р 57700.2 Численное моделирование для разработки и сдачи в эксплуатацию высокотехнологичных промышленных изделий. Сертификация программного обеспечения. Общие положения

Примечание – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **исследуемый объект**: Изделие, фрагмент изделия или образец, изготовленный в тех же условиях, из той же партии сырья и по тем же требованиям нормативной документации, что и изделие.

3.2 **остаточные напряжения**: Напряжения, действующие в объеме в отсутствии внешних силовых воздействий, которые возникли вследствие технологических операций.

3.3 **тензорезисторная розетка**: Измерительный преобразователь, содержащий на общей подложке чувствительные элементы тензорезистора, главные оси которых ориентированы под определенными углами друг к другу.

[ГОСТ 20420-75, пункт 7]

Примечание – Допускается использование терминологического сокращения «тензорозетка».

3.4 **спекл (спекл-текстура):** Фрагмент хаотичной текстуры в виде контрастных черных точек на белом фоне.

3.5 **метод корреляции цифровых изображений (КЦИ)**: Метод, основанный на определении перемещений спеклов на поверхности исследуемого объекта.

3.6 **оптическая система корреляции цифровых изображений**: Система, состоящая из фото или видеокамер, оборудованная программным комплексом для фиксации и определения перемещений спеклов по изображениям исследуемого объекта с помощью метода корреляции цифровых изображений.

3.7 **разрешение съемки**: Значение, определяющее соотношение физического размера исследуемого объекта и его цифрового размера на изображении.

3.8 **поле перемещений**: Совокупность перемещений спеклов на поверхности исследуемого объекта в трех ортогональных направлениях, полученных методом корреляции цифровых изображений.

3.9 **метод конечных элементов**: Сеточный метод численного решения задач математической физики, в котором дискретизация исходных краевых задач производится на основе вариационных или проекционных методов при использовании специальных конечномерных подпространств функций, определяемых выбранной сеткой.

[ГОСТ Р 57188–2016, пункт 2.3.6]

4 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

*Ra­* –шероховатость поверхности исследуемого объекта, мкм;

*W* – толщина исследуемого объекта, мм;

*D0* – номинальный или фактический диаметр отверстия, мм;

*D* – диаметр измерения деформаций вокруг отверстия, мм;

– нормированный диаметр;

– нормированная толщина исследуемого объекта;

*GL* – база тензодатчика (длина зоны измерения деформаций) с центром на линии диаметра измерения деформаций *D*, мм;

*GW* – ширина тензодатчика (ширина зоны измерения деформаций) с центром на линии диаметра измерения деформаций *D*, мм;

, *,* – величины деформаций, зафиксированные на заданной ступени сверлении отверстия по глубине;

– глубина сверления отверстия на -й ступени, мм;

– глубина -й ступени остаточных напряжений, оказывающих влияние на -ю ступень сверления;

– изотропные деформации после сверления на -й ступени;

, – сдвиговые деформации после сверления на -й ступени;

– изотропные напряжения после сверления на -й ступени, МПа;

, – касательные напряжения после сверления на -й ступени, МПа;

– модуль упругости материала исследуемого объекта, ГПа;

– коэффициент Пуассона материала исследуемого объекта;

– поправка на диаметр отверстия;

– поправка на толщину исследуемого объекта;

, , , , , – аппроксимирующие константы на малую толщину исследуемого объекта для трех ближайших значений нормированного диаметра, ближайших к измеренному на исследуемом объекте;

…, … – аппроксимирующие константы для определения калибровочных коэффициентов и соответственно;

– матрица калибровочных коэффициентов для изотропных напряжений;

– матрица калибровочных коэффициентов для касательных напряжений;

– матрица регуляризации (по А.Н. Тихонову);

, , – параметры сглаживающей регуляризации (по А. Н. Тихонову);

, – нормальные напряжения по осям *x* и *y* соответственно, МПа;

– касательные напряжения в плоскости *xy*, МПа;

, – главные максимальные и минимальные напряжения соответственно, МПа;

– угол между осью *x* (направление тензодатчика 1) и максимальными главными напряжениями, радиан;

, , – величины перемещений спеклов по осям *x*, *y* и *z* соответственно, мм;

– угол относительно оси *x* на полях перемещений (полярная координата перемещений по полям), радиан;

– расстояние от центра отверстия на полях перемещений (полярная координата перемещений по полям), мм;

, , , , – поправочные коэффициенты (вектора) на несквозное отверстие для определения остаточных напряжений по полям перемещений;

, , , , , , , , – коэффициенты пропорциональности, связывающие поля перемещений с остаточными напряжениями;

– матрица коэффициентов пропорциональности (дополнительное обозначение подстрочного индекса вводится для обозначения шага сверления);

– нулевая матрица с размерами матрицы .

5 Сущность метода

Сущность метода заключается в измерении поверхностных деформаций методом тензометрии или перемещений методом корреляции цифровых изображений, возникающих при ступенчатом сверлении отверстия в исследуемом объекте. Распределение по глубине действующих в плоскости поверхности однородных или неоднородных остаточных напряжений определяется с помощью численных расчетов.

6 Образцы для испытаний

6.1 Определение остаточных напряжений проводить на плоской поверхности исследуемого объекта. Допускается проводить определение остаточных напряжений на криволинейной поверхности с радиусом кривизны не менее, чем 40 номинальных диаметров отверстия *D*0.

6.2 Поверхность исследуемого объекта в зоне предполагаемого сверления отверстия должна быть очищена и не иметь следов оксидов или ржавчины.

6.3 Поверхность исследуемого объекта должна быть гладкой и ровной, без сколов, трещин, расслоений и других дефектов, заметных невооруженным глазом. Рихтовка или другой вид правки не допускается.

6.4 Перед испытанием исследуемые объекты маркируют. Маркировка должна позволять однозначно идентифицировать объекты. Маркировка не должна повреждаться в ходе проведения испытаний, а также влиять на выполнение и результаты испытаний.

7 Оборудование для испытаний

7.1 Сверление отверстий проводят на оборудовании, обеспечивающем скорость вращения режущего инструмента не менее 20 000 об/мин. Рекомендуется использовать оборудование со скоростью вращения режущего инструмента более 40 000 об/мин.

7.2 При сверлении применяется режущий инструмент из высокопрочного материала в виде сверла или концевой фрезы с профилем «обратный конус». Углы режущих кромок не должны отклоняться более, чем на 1º относительно перпендикулярной к оси режущего инструмента плоскости.

7.3 Измерение деформаций в зоне сверления отверстия проводится с помощью тензодатчиков по ГОСТ 21616 или с помощью оптических систем фиксации полей перемещений и деформации на поверхности.

7.3.1 Рекомендуется использовать тензорозетки с взаимным расположением измерительных осей 0º / 135º / 270º (тип A) или 0º / 45º / 90º (тип B, С) (рисунок 1).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| C:\Users\VIAM\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\1-1.png | C:\Users\VIAM\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\1-2.png | C:\Users\VIAM\AppData\Local\Microsoft\Windows\INetCache\Content.Word\1-3.png |
| а | б | в |

а – тип A; б – тип B; в – тип С

Рисунок 1 – Тензорозетки для измерения деформаций в зоне сверления отверстия (цифрами обозначены порядковые номера тензодатчиков; для типа С дополнительное обозначение буквами R и T – для пар противолежащих тензодатчиков)

7.3.2 Оптические системы фиксации полей перемещений и деформации, основанные на методе корреляции цифровых изображений, должны обеспечивать фиксацию изображений с разрешением съемки объекта исследований не менее 100 пикс/мм.

7.3.3 Для нанесения спеклов используют аэрозольное напыление аэрографом или другой метод нанесения, позволяющий формировать контрастные точки диаметром не более 1 мм.

7.4 Контроль позиции режущего инструмента, контроль геометрии отверстия проводится с помощью оптического микроскопа. Рекомендуется использовать инструментальный микроскоп ИМЦ 100х50, А по ГОСТ 8074.

7.5 Программное обеспечение для проведения расчетов методом конечных элементов должно быть сертифицировано по ГОСТ Р 57700.2.

7.6 Все используемое оборудование и средства измерения должны быть аттестованы, поверены (откалиброваны) и иметь действующие аттестаты, свидетельства о поверке (сертификаты о калибровке, знаки поверки).

8 Подготовка к проведению испытаний

## 8.1 Подготовка к измерениям деформаций с помощью тензодатчиков

8.1.1 При выборе размеров тензорозетки руководствуются классификацией исследуемого объекта по относительной толщине в соответствии со следующими условиями:

- «тонкостенный» - при толщине менее 0,25*D* (для тензорозеток типов A и B) или менее 0,6*D* (для тензорозетки типа С);

- «переходной толщины» - при толщине от 0,25*D* до 0,6*D* (для тензорозеток типов A и B) или от 0,6*D* до1,3*D* (для тензорозетки типа С);

- «массивный» - при толщине более 0,6*D* (для тензорозеток типов A и B) или более 1,3*D* (для тензорозетки типа С).

Рекомендуется выбирать размеры тензорозеток таким образом, чтобы толщина исследуемого объекта по указанной классификации была определена «массивной».

Схематичное расположение тензодатчика относительно предполагаемого места сверления отверстия представлено на рисунке 2.

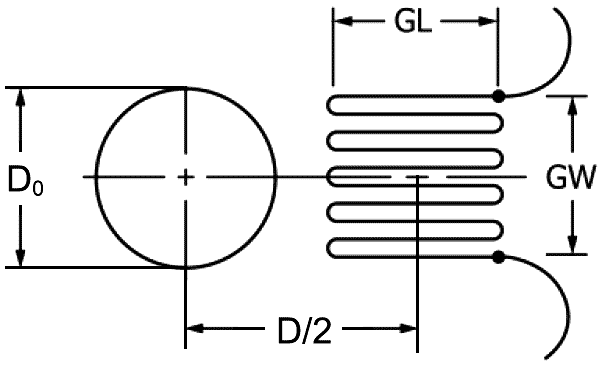


Рисунок 2 – Схема расположения тензодатчиков относительно предполагаемого места сверления отверстия (D/2 – половина от величины D)

В таблице 1 представлены размеры тензорозеток и величина ступени глубины при сверлении отверстия номинальным диаметром *D0* равным 2 мм. Допускается сверление отверстия номинальным диаметром другого размера, с пропорциональным изменением в таблице 1 всех размеров тензодатчиков и ступени сверления.

Таблица 1 – Выбор размеров тензорозеток и ступени сверления

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Тип тензорозетки | *D0*, мм | *D*, мм | *GL*, мм | *GW*, мм | Ступень (глубина) сверления, мм | |
| Однородные напряжения | Неоднородные напряжения |
| Тип A | 2 | 5,13 | 1,59 | 1,59 | 0,1 \*\* | 0,05 |
| Тип B | 1,14 |
| Тип С | 4,32 | 0,76 | 30º \* |
| \* Ширина сектора измерительной части тензодатчика.  \*\* Для «тонкостенного» исследуемого объекта сверление проводится на одну ступень, равную меньшему значению из двух: 0,2*D* или толщине исследуемого объекта. | | | | | | |

8.1.2 Для наклеивания тензорозеток рекомендуется использовать клей на основе цианокрилата. При этом шероховатость поверхности *Ra* должна быть от 2,0 до 4,0 мкм.

8.1.3 На поверхность исследуемого объекта в зоне предполагаемого сверления отверстия наклеивается тензорозетка. При использовании трех отдельных тензодатчиков их наклеивание проводится в соответствии со взаимным расположением тензодатчиков на одном из типов тензорозетки.

При использовании тензорозеток типов A и С наклеивание проводится на расстоянии не менее 1,5*D* от края исследуемого объекта или от места другого сверления отверстия. При использовании тензорозетки типа B наклеивание проводится на расстоянии не менее 0,5*D* от края исследуемого объекта с расположением тензодатчиков с противоположной стороны от края или от места другого сверления отверстия.

8.1.4 Проводят позиционирование режущего инструмента относительно центра тензорозетки. С помощью оптического микроскопа проводят контроль их соосности с обеспечением отклонения осей не более ± 0,004*D*.

8.1.5 Для тензорозеток типов A и B обнуляют текущие значения деформаций *ɛ1*, *ɛ2,* *ɛ3* от трех тензодатчиков.

Для тензорозетки тип С проводят обнуление текущих значений деформаций с шести тензодатчиков, осреднение деформаций по противолежащим относительно отверстия парам тензодатчиков (средние значения с датчиков одного порядкового номера, с разным буквенным обозначением - R и T). Полученные средние значения принимаются равными деформациям *ɛ1*, *ɛ2,* *ɛ3.*

## 8.2 Подготовка к измерениям перемещений с помощью оптической системы корреляции цифровых изображений

8.2.1 Перед началом испытаний на поверхность исследуемого объекта в зоне предполагаемого сверления отверстия последовательно наносят белый фон и контрастные черные точки, формирующие спеклы. Пример спеклов представлен на рисунке 3. Не допускается нанесение спеклов с повторяющейся, периодической текстурой.

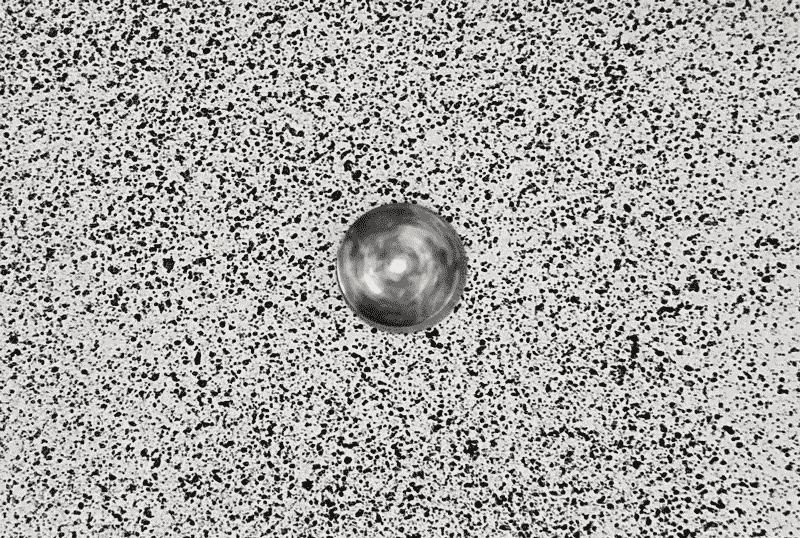


Рисунок 3 – Пример спеклов, нанесенных на поверхность исследуемого объекта в зоне сверления отверстия

Зона предполагаемого отверстия должна быть расположена на расстоянии не менее 4*D0* от края исследуемого объекта или от места другого сверления отверстия.

8.2.2 Фиксацию полей перемещений проводят на поверхности исследуемого объекта, которая должна быть открыта для съемки изображений в течение всего процесса испытаний.

8.2.3 Видеокамеры, применяемые для фиксации изображений спеклов, должны располагаться на одинаковом расстоянии относительно зоны предполагаемого сверления отверстия. Рекомендуется располагать видеокамеры таким образом, чтобы оси объективов образовывали угол от 15º до 45º. Схематичное расположение показано на рисунке 4.

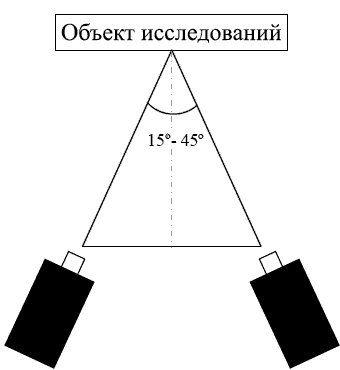


Рисунок 4 – Схематичное расположение видеокамер относительно зоны предполагаемого сверления отверстия

8.2.4 Коррекцию оптических искажений объективов, а также определение их взаимного расположения относительно зоны предполагаемого сверления отверстия, проводят с помощью калибровочной сетки в программном обеспечении для отслеживания и определения перемещений.

8.2.5 Калибровочную сетку помещают в поле кадра объективов двух камер, в зоне предполагаемого сверления отверстия.

8.2.6 С помощью программного обеспечения регистрации изображений проводят регистрацию не менее 20 изображений калибровочной сетки заданного размера. При съемке каждого следующего изображения пространственное расположение калибровочной сетки перед объективами должно меняться.

8.2.7 Проводят регистрацию не менее 20 опорных изображений спеклов в зоне предполагаемого сверления отверстия исследуемого объекта.

9 Проведение испытаний

9.1 Плавно подводят режущий инструмент к поверхности исследуемого объекта в зоне сверления отверстия. По показаниям осевого тензодатчика, индикаторов часового типа или электросопротивления между исследуемым объектом и режущим инструментом (электроконтакт) определяют момент касания режущего инструмента поверхности. Значение глубины сверления в данном положении инструмента принимается за начальное (определяется равным нулю).

9.2 Проводят сверление отверстия в глубину на одну ступень в соответствии с п. 8.1.1. Скорость вертикальной подачи режущего инструмента не более 0,25 мм/мин. Скорость вращения режущего инструмента устанавливается в диапазоне от 20 000 до 400 000 об/мин.

Примечание – Допускается сверление отверстия на большую или меньшую глубину, чем ступень (глубина) сверления по п. 8.1.1 с определением соответствующих значений деформаций от тензодатчиков или перемещений, полученных с помощью метода корреляции цифровых изображений.

В процессе сверления используют систему сжатого воздуха для удаления стружки и охлаждения материала исследуемого объекта в зоне сверления.

9.3 После сверления на одну ступень проводят выдержку для обеспечения измерений деформации или перемещений при постоянной температуре.

9.3.1 При использовании тензодатчиков выдержка проводится до стабилизации значений деформаций.

9.3.2 При использовании оптической системы измерения полей перемещений проводится выдержка не менее 10 с.

9.4 При отключенном вращении режущего инструмента и без подачи сжатого воздуха проводят фиксацию изменений деформации или перемещений.

9.4.1 При использовании тензодатчиков в составе тензорозетки проводят фиксацию трех значений деформации *ɛ1*, *ɛ2,* *ɛ3* для текущего значения глубины (ступени).

9.4.2 При использовании оптической системы измерения полей перемещений проводят регистрацию изображений спеклов в области сверления отверстия. Количество изображений для регистрации должно быть равно количеству опорных изображений по п. 8.2.7.

9.5 При определении однородных остаточных напряжений на «массивных» и «переходной толщины» исследуемых объектах процедуру испытания повторяют по п. 9.2-9.4 до достижения глубины отверстия, равной 0,2*D* (для тензорозеток тип А или В) или равной 0,24*D* (для тензорозетки тип С).

При определении неоднородных остаточных напряжений процедуру испытания повторяют по п. 9.2-9.4, пока выполняются следующие условия:

- до достижения глубины отверстия, равной 0,2*D* (для тензорозеток тип А или В) или равной 0,24*D* (для тензорозетки тип С);

- до достижения глубины, равной 0,6 от толщины *W* (для тензорозеток тип А или В) или равной 0,5 от толщины *W* (для тензорозетки тип С) исследуемого объекта.

9.6 После окончания сверления фиксируют с помощью оптического микроскопа фактический диаметр отверстия *D0* по измерениям в двух взаимоперпендикулярных направлениях, проводят контроль чистоты изготовления отверстия по отсутствию на поверхности следов неравномерного удаления материала (расслоений и заусенцев). Результат измерения фактического диаметра округляют до 0,01 мм.

9.6.1 При использовании тензодатчиков для измерения деформаций проводят контроль соосности отверстия относительно диаметра измерения деформаций *D.* Допускаемое отклонение от соосности не более ± 0,004*D*.

10 Обработка результатов

## 10.1 Определение остаточных напряжений по измерениям деформаций, полученных с помощью тензодатчиков

10.1.1 Измеренные значения деформаций *ɛ1*, *ɛ2,* *ɛ3* контролируют по их убыванию или возрастанию по глубине. Результаты измерений не используются при нарушении плавного изменения деформаций по глубине (например, при фиксировании выбросов), а процедуру сверления отверстия с измерениями деформаций проводят повторно на другом участке исследуемого объекта.

10.1.2 Вычисляют комбинации деформации для каждой *j*‑й ступени сверления отверстия в соответствии с формулами

(1)

(2)

(3)

10.1.3 Вычисляют значения матриц калибровочных коэффициентов и , и матрицы регуляризации для каждой *j*‑й ступени сверления отверстия. Процедура вычислений представлена в А.1-А.6 (приложение А).

10.1.4 При определении однородных по глубине остаточных напряжений вычисляют комбинации напряжений , , в соответствии с формулами

, (4)

, (5)

. (6)

10.1.5 При определении неоднородных по глубине остаточных напряжений комбинации напряжений , , вычисляют с помощью решения систем линейных уравнений в виде

, (7)

, (8)

. (9)

Примечание - Рекомендуемые начальные значения сглаживающих параметров , , для регуляризации – в интервале от 1∙10-4 до 1∙10-6.

Вычисляют стандартное отклонение комбинаций деформации , , по формулам

(10)

(11)

(12)

где n – суммарное количество комбинаций деформаций , , на текущей *j*‑й ступени сверления отверстия.

Вычисляют среднеквадратичное отклонение полученных после регуляризации комбинаций деформации , , от первоначальных по формулам

(13)

, (14)

. (15)

Если значения , , отличаются более, чем на ± 5% от соответствующих значений , , , то определяют новые значения сглаживающих параметров , , по формулам (16)-(18) и проводят повторные расчеты по п. 10.1.5. Расчеты значений сглаживающих параметров прекращают при выполнении указанных выше условий.

, (16)

(17)

(18)

10.1.6 Напряжения , , на глубине *j*-й ступени сверления вычисляют по формулам

*,*  (19)

*,*  (20)

*.*  (21)

10.1.7 Главные напряжения и на глубине *j*-й ступени сверления вычисляют по формуле

(22)

10.1.8 Угол между расположением оси *x* (направление измерений тензодатчика 1) и вектором действия главного максимального напряжения на глубине *j*-й ступени сверления вычисляют по формуле

(23)

## 10.2 Определение остаточных напряжений по измерениям перемещений, полученных с помощью оптической системы корреляции цифровых изображений

10.2.1 Анализ перемещений спеклов проводят в программном пакете для отслеживания и определения перемещений по серии опорных изображений и сериям изображений спеклов, зафиксированных при разных ступенях сверления отверстия.

10.2.2 Полученные поля перемещений усредняют по соответствующим сериям: с изображений со спеклами, полученных перед сверлением (на опорных изображениях); с изображений для каждой ступени сверления отверстия.

10.2.3 Координаты , , полей перемещений центрируют относительно отверстия. Для поиска центра отверстия рекомендуется использовать автоматизированные алгоритмы обработки изображений. Допускается визуальное определение координат центра отверстия с отметкой в протоколе испытаний.

10.2.4 Преобразуют декартовы координаты , , в цилиндрические координаты , , соответственно, и ограничивают область дальнейшего анализа полей перемещений по условию

(24)

10.2.5 С использованием метода конечных элементов определяют значения поправочных коэффициентов , , , , для каждой ступени сверления. Процедура определения коэффициентов приведена в приложении Г.

Примечание – Вычисление коэффициентов проводят с учетом моделирования профиля несквозного отверстия, применяемого при сверлении.

10.2.6 Определяют значения коэффициентов пропорциональности, связывающих поля перемещений с полем остаточных напряжений на каждой ступени сверления.

, (25)

(26)

, (27)

, (28)

, (29)

, (30)

, (31)

, (32)

(33)

10.2.7 Определяют матрицы коэффициентов пропорциональности на каждой ступени сверления по формуле

(34)

10.2.8 Напряжения , , на всех ступенях сверления (от 1 до *j*-й ступени) вычисляют с помощью решения матричного уравнения, представленного в виде

(35)

10.2.9 Главные напряжения и на глубине всех ступеней сверления (от 1 до *j*-й ступени сверления) вычисляют по формуле

(36)

10.2.10 Угол между расположением оси *x* (направление действия напряжений ) и вектором действия главного максимального напряжения вычисляют по формуле (23) в соответствии с п. 10.1.8.

10.3 По результатам расчетов остаточных напряжений строят график зависимости напряжений и от глубины сверления.

11 Протокол испытаний

11.1 Результаты испытаний заносят в протокол испытаний, который должен содержать следующие данные:

- наименование материала;

- номер партии исследуемого объекта (при наличии);

- наименование предприятия-изготовителя;

- метод изготовления исследуемого объекта и подготовки поверхности;

- оборудование (установка АП), применяемое для изготовления исследуемого объекта;

- количество исследуемых объектов, их маркировку и геометрические размеры;

- метод расчета остаточных напряжений: по деформациям (с указанием классификации исследуемого объекта по относительной толщине и однородности/неоднородности распределения остаточных напряжений по глубине) или по перемещениям.

- условия (режимы) сверления (скорости вращения и подачи сверла);

- тип средств измерений и испытаний, заводской номер;

- значения напряжений , , угол по глубине сверления для исследуемого объекта;

- дату проведения испытаний;

- ссылку на настоящий стандарт;

- Ф.И.О. исполнителей.

11.2 Дополнительно протокол может содержать: графические изображения распределения деформаций ɛ1, ɛ2, ɛ3 или поля перемещений на каждой ступени сверления отверстия для каждого исследуемого объекта, зон сверления исследуемого объекта или для серий исследуемых объектов; фотографии исследуемого объекта.

Приложение А.1

(справочное)

Определение калибровочных коэффициентов , для однородных по глубине остаточных напряжений в «тонкостенных» исследуемых объектах

А.1.1 Определяют поправку на диаметр отверстия по следующим формуле (А.1.1) для тензорозеток тип А, тип В, или по формуле (А.1.2) для тензорозеток тип С.

(А.1.1)

(А.1.2)

А.1.2 Калибровочные коэффициенты , определяют по формулам

, (А.1.3)

. (А.1.4)

Константы , , , , , для тензорозеток типов A, B и C указаны в таблице А.1.1.

Таблица А.1.1 – Константы для формул (А.1.3) и (А.1.4).

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Тип тензорозетки** |  |  |  |  |  |  |
| A | -0,090 | -0,160 | -0,250 | -0,289 | -0,478 | -0,664 |
| B | -0,096 | -0,170 | -0,266 | -0,331 | -0,542 | -0,743 |
| C | -0,265 | -0,471 | -0,736 | -0,554 | -0,806 | -0,877 |

Приложение А.2

(справочное)

Определение калибровочных коэффициентов , для однородных по глубине остаточных напряжений в «массивных» исследуемых объектах

А.2.1 Для каждой -й ступени сверления определяют константы …, …. Для этого используют три группы констант:

- указанные в таблице Б.1 (для тензорозетки тип A) или в таблице Б.2 (для тензорозетки тип B) приложения Б - для нормированной толщины , равной 0,6;

- указанные в таблице Б.3 (для тензорозетки тип C) - для нормированной толщины равной 1,3.

А.2.2 Для каждой -й ступени сверления по выбранным значениям для трех групп констант, соответствующих нормированным диаметрам:

- равными 0,3, 0,4 и 0,5 (для тензорозеток типов A и B);

- равными 0,36, 0,48 и 0,60 (для тензорозетки тип C)

Определяют соответствующие значения констант , , , , , по следующим формулам:

(А.2.1)

. (А.2.2)

Примечание – Для значений , и выбираются минимальное, среднее и максимальное значения нормированных диаметров из таблицы соответственно.

А.2.3 Калибровочные коэффициенты , для каждой -й ступени сверления определяют по формулам (А.1.1) – (А.1.4).

Приложение А.3

(справочное)

Определение калибровочных коэффициентов , для однородных по глубине остаточных напряжений в исследуемых объектах «переходной толщины»

А.3.1 Для каждой -й ступени сверления определяют константы …, … по таблице А.2.1. Для этого используют три группы констант.

Для первой группы используются константы, соответствующие табличному значению нормированной толщины , наиболее близкому к нормированной толщине исследуемого объекта.

***Пример***

***Если нормированная толщина исследуемого объекта равна 0,32, а измерения деформаций проводят с использованием тензорозетки тип А, тогда для первой группы констант выбирают значения равные 0,3.***

Для второй и третьей групп констант используются табличные константы нормированных толщин, на шаг меньше и больше выбранной величины для первой группы.

***Пример***

***Если нормированная толщина   равна 0,3, то для двух групп констант выбирают значения равное 0,25 и равное 0,4.***

А.3.2 Для каждой -й ступени сверления определяют константы , , ,, , , соответствующих нормированным толщинам , , по формулам (А.1.1) – (А.1.4).

А.3.3 По выбранным значениям для трех групп констант определяют поправку на толщину по формуле:

(А.3.1)

А.3.4 Калибровочные коэффициенты , для каждой -й ступени сверления определяют по формулам

(А.3.2)

(А.3.3)

Приложение А.4

(справочное)

Определение калибровочных коэффициентов , , для неоднородных по глубине остаточных напряжений в «массивных» исследуемых объектах

А.4.1 Для каждой -й ступени сверления определяют константы …, …. Для этого используют три группы констант:

- указанные в таблицах В.1 и В.2 (для тензорозетки тип A) или в таблицах Г.3 и Г.4 (для тензорозетки тип B) приложения В - для нормированной толщины равной 0,6;

- указанные в таблицах В.5 и В.6 (для тензорозетки тип C) Приложения В - для нормированной толщины равной 1,3.

А.4.2 Для каждой -й ступени сверления отверстия и -й ступени остаточных напряжений по выбранным значениям для трех групп констант, соответствующих нормированным диаметрам:

- равными 0,3, 0,4 и 0,5 (для тензорозеток типов A и B);

- равными 0,36, 0,48 и 0,60 (для тензорозетки тип C).

Определяют соответствующие значения матриц калибровочных коэффициентов и по формулам (А.4.1) и (А.4.2) (индексы «-», «0», «+» обозначают минимальный, средний и максимальный нормированные диаметры для используемой тензорозетки).

|  |  |
| --- | --- |
| , | (А.4.1) |
|  | (А.4.2) |

Примечание – Матрицы и являются нижнетреугольными (число столбцов равно числу строк, все значения равны нулю при ), поскольку индекс принимает значения от 1 до N (N – количество ступеней сверления), а индекс принимает значения от 1 до .

А.4.3 По трем матрицам и (с обозначениями индексов «‑», «0», «+» каждая) вычисляют значения трех матриц калибровочных коэффициентов и (с обозначениями индексов «-», «0», «+» каждая) по формулам (А.4.3) и (А.4.4). Значение приравнивается нулю.

, (А.4.3)

. (А.4.4)

А.4.4 Калибровочные коэффициенты , для каждой -й ступени сверления определяют по формулам (А.1.1) – (А.1.4), используя при этом три матрицы калибровочных коэффициентов и (с обозначениями индексов «-», «0», «+» каждая).

А.4.5 Матрицу составляют в форме, представленной в (А.4.5). Количество столбцов и строк в матрице равно количеству ступеней сверления отверстия.

(А.4.5)

Приложение А.5

(справочное)

Определение калибровочных коэффициентов , , для неоднородных по глубине остаточных напряжений в «тонкостенных» исследуемых объектах

А.5.1 Для каждой -й ступени сверления определяют константы …, …. Для этого используют три группы констант:

- указанные в таблицах В.1 и В.2 (для тензорозетки тип A) или в таблицах В.3 и В.4 (для тензорозетки тип B) Приложения В - для нормированной толщины равной 0,25;

- указанные в таблицах В.5 и В.6 (для тензорозетки тип C) Приложения В - для нормированной толщины равной 0,6.

А.5.2 Для каждой -й ступени сверления отверстия и -й ступени остаточных напряжений по выбранным значениям для трех групп констант, соответствующих нормированным диаметрам:

- равными 0,3, 0,4 и 0,5 (для тензорозеток типов A и B);

- равными 0,36, 0,48 и 0,60 (для тензорозетки тип C)

определяют соответствующие значения матриц калибровочных коэффициентов и по формулам (А.4.1) и (А.4.2). При этом в формулах значения и умножают на величину равную (для тензорозеток типов A и B) или равную (для тензорозетки тип C).

А.5.3 Калибровочные коэффициенты , , для каждой -й ступени сверления определяют в соответствии с пунктами (А.4.3) – (А.4.5).

Приложение А.6

(справочное)

Определение калибровочных коэффициентов , , для неоднородных по глубине остаточных напряжений в исследуемых объектах «переходной толщины»

А.6.1 В соответствии с указанными в таблицах В.1-В.6 приложения В значениями, выбирают три табличных значения нормированных толщин , , . Табличное значение нормированной толщины выбирается, как наиболее близкое к нормированной толщине исследуемого объекта. Табличные значения нормированных толщин и выбирают на шаг меньше и больше относительно значения .

***Пример***

***Если нормированная толщина исследуемого объекта равна 0,32, а измерения деформаций проводят с использованием тензорозетки тип А, тогда используют табличное значение нормированной толщины равное 0,3. Соответственно, табличные значения нормированных толщин и равны 0,25 и 0,4.***

А.6.2 Для каждой -й ступени сверления определяют константы …, … указанные в таблицах В.1 и В.2 (для тензорозетки тип A) или В.3 и В.4 (для тензорозетки тип B) или В.5 и В.6 (для тензорозетки тип C). Для этого используют выбранные значения нормированных толщин , , и нормированных диаметров:

- равными 0,3, 0,4 и 0,5 (для тензорозеток типов A и B);

- равными 0,36, 0,48 и 0,60 (для тензорозетки тип C).

Б.6.3 Для каждой -й ступени сверления определяют значения матриц калибровочных коэффициентов и по формулам (А.4.1) и (А.4.2).

Примечание – Матрицы и определяют для каждой ступени сверления, для каждого из трех выбранных значений , , , и для каждого из трех табличных значений нормированных диаметров . Итоговое количество каждой из матриц и на одной ступени сверления равно 9.

А.6.4 Для каждой -й ступени сверления, табличного значения нормированной толщины и табличного значения нормированного диаметра вычисляют значения матриц калибровочных коэффициентов и (с обозначениями индексов «-», «0», «+» минимального, среднего и максимального нормированных диаметров для используемой тензорозетки) по формулам (А.4.3) и (А.4.4). Значение приравнивается нулю.

А.6.5 Калибровочные коэффициенты , для каждой -й ступени сверления, табличного значения нормированной толщины и табличного значения нормированного диаметра вычисляют по формулам (А.3.1) - (А.3.3).

А.6.6 Калибровочный коэффициент определяют в соответствии с пунктом А.4.5.

Приложение Б

(обязательное)

Значения констант для определения однородных остаточных напряжений

в «переходной толщины» и «массивных» исследуемых объектах

Таблица Б.1 – Значения констант при различных нормированных диаметрах и нормированных толщинах (для тензорозетки тип A)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,3 | 0,25 | -0,50362 | -11,140 | 101,09 | -319,99 | 402,56 | -0,81935 | -12,734 | 87,089 | -217,59 | 206,2 |
| 0,3 | -0,42321 | -8,9426 | 74,746 | -224,58 | 263,41 | -0,74914 | -11,930 | 78,748 | -193,69 | 185,87 |
| 0,4 | -0,33352 | -7,2865 | 57,715 | -170,69 | 194,44 | -0,67123 | -11,294 | 71,862 | -170,4 | 152,96 |
| 0,6 | -0,30948 | -6,7619 | 54,910 | -169,14 | 201,70 | -0,63325 | -11,195 | 70,922 | -167,49 | 148,52 |
| 0,4 | 0,25 | -0,86113 | -19,711 | 169,71 | -481,69 | 499,51 | -1,4318 | -21,788 | 153,77 | -394,09 | 383,12 |
| 0,3 | -0,73061 | -16,464 | 135,48 | -388,12 | 412,48 | -1,3121 | -20,579 | 140,87 | -346,97 | 309,78 |
| 0,4 | -0,60162 | -13,605 | 107,70 | -304,10 | 311,85 | -1,1861 | -19,766 | 132,33 | -316,15 | 261,25 |
| 0,6 | -0,57899 | -12,529 | 104,89 | -323,22 | 374,46 | -1,1344 | -19,69 | 133,45 | -325,4 | 279,39 |
| 0,5 | 0,25 | -1,3214 | -35,575 | 339,04 | -1125,3 | 1399,7 | -2,2249 | -38,524 | 334,12 | -1107,7 | 1438,6 |
| 0,3 | -1,1574 | -30,517 | 284,15 | -951,32 | 1188,6 | -2,0518 | -37,085 | 317,13 | -1030,5 | 1281,1 |
| 0,4 | -1,0048 | -26,130 | 241,63 | -818,25 | 1028,0 | -1,8786 | -36,333 | 308,91 | -998,97 | 1226,3 |
| 0,6 | -1,0283 | -22,771 | 219,75 | -771,27 | 1002,3 | -1,8255 | -36,144 | 310,62 | -1014,5 | 1258,2 |

Таблица Б.2 – Значения констант при различных нормированных диаметрах и нормированных толщинах (для тензорозетки тип B)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,3 | 0,25 | -0,53572 | -11,963 | 108,89 | -345,92 | 435,69 | -0,89677 | -14,486 | 97,399 | -238,52 | 213,98 |
| 0,3 | -0,45097 | -9,6437 | 81,038 | -244,55 | 286,80 | -0,82656 | -13,617 | 88,949 | -215,84 | 200,10 |
| 0,4 | -0,35759 | -7,8993 | 63,084 | -187,45 | 213,48 | -0,74844 | -12,930 | 81,943 | -192,62 | 168,45 |
| 0,6 | -0,33297 | -7,3189 | 59,985 | -185,63 | 221,27 | -0,71045 | -12,805 | 81,198 | -191,21 | 166,82 |
| 0,4 | 0,25 | -0,91608 | -21,388 | 186,48 | -540,49 | 575,59 | -1,5639 | -25,004 | 175,87 | -451,30 | 431,21 |
| 0,3 | -0,77905 | -17,982 | 150,45 | -440,98 | 481,04 | -1,4431 | -23,687 | 162,67 | -404,14 | 361,30 |
| 0,4 | -0,64624 | -14,925 | 120,51 | -348,51 | 367,58 | -1,3164 | -22,787 | 153,97 | -373,59 | 314,79 |
| 0,6 | -0,6240 | -13,694 | 116,72 | -365,77 | 429,85 | -1,2647 | -22,651 | 155,45 | -386,21 | 339,50 |
| 0,5 | 0,25 | -1,4114 | -39,127 | 382,04 | -1311,5 | 1692,6 | -2,4244 | -44,554 | 391,88 | -1326,5 | 1748,0 |
| 0,3 | -1,2463 | -33,510 | 319,30 | -1096,5 | 1403,1 | -2,2485 | -42,992 | 374,49 | -1247,9 | 1587,5 |
| 0,4 | -1,0907 | -28,807 | 273,37 | -950,25 | 1223,7 | -2,0735 | -42,136 | 366,11 | -1216,8 | 1534,7 |
| 0,6 | -1,1267 | -24,700 | 243,88 | -870,68 | 1146,0 | -2,0213 | -41,801 | 367,56 | -1233,1 | 1569,7 |

Таблица Б.3 – Значения констант при различных нормированных диаметрах и нормированных толщинах (для тензорозетки тип C).

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,36 | 0,6 | -0,74676 | -13,651 | 92,345 | -238,45 | 238,02 | -0,90032 | -17,049 | 83,732 | -136,84 | 57,070 |
| 0,7 | -0,71128 | -13,096 | 88,950 | -231,18 | 231,99 | -0,93710 | -17,319 | 86,252 | -145,64 | 68,960 |
| 0,9 | -0,68292 | -12,600 | 86,395 | -226,61 | 229,03 | -0,98058 | -17,658 | 89,221 | -155,89 | 82,430 |
| 1,3 | -0,66901 | -12,272 | 85,294 | -225,90 | 229,79 | -1,0250 | -18,032 | 92,226 | -166,02 | 95,450 |
| 0,48 | 0,6 | -1,3720 | -25,615 | 177,70 | -457,43 | 441,18 | -1,4956 | -31,664 | 180,52 | -364,85 | 242,46 |
| 0,7 | -1,3180 | -24,638 | 172,92 | -452,35 | 443,63 | -1,5604 | -31,951 | 183,61 | -375,94 | 257,75 |
| 0,9 | -1,2739 | -23,753 | 169,96 | -454,11 | 455,39 | -1,6374 | -32,304 | 187,19 | -388,86 | 274,53 |
| 1,3 | -1,2528 | -23,088 | 168,95 | -459,52 | 468,10 | -1,7164 | -32,745 | 191,39 | -403,93 | 294,70 |
| 0,6 | 0,6 | -2,3772 | -48,588 | 398,75 | -1219,4 | 1386,8 | -2,2042 | -59,907 | 461,03 | -1344,0 | 1458,1 |
| 0,7 | -2,3161 | -46,558 | 386,72 | -1193,9 | 1366,3 | -2,2973 | -60,407 | 466,78 | -1368,0 | 1494,3 |
| 0,9 | -2,2751 | -44,289 | 374,10 | -1165,8 | 1340,4 | -2,4142 | -60,764 | 471,12 | -1385,8 | 1520,6 |
| 1,3 | -2,2761 | -41,961 | 361,66 | -1133,2 | 1302,3 | -2,5374 | -61,142 | 475,78 | -1405,3 | 1548,7 |

Приложение В

(обязательное)

Значения констант для определения неоднородных остаточных напряжений

в «переходной толщины» и «массивных» исследуемых объектах

Таблица В.1 – Значения констант … при различных нормированных диаметрах и нормированных толщинах (для тензорозетки тип A)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,3 | 0,25 | -0,50362 | 5,0067 | -16,147 | 37,188 | -61,903 | 125,82 | 84,311 | -583,37 | 704,52 | -525,47 | 31,254 | -635,55 | 2320,9 | -2310,7 | 996,67 |
| 0,3 | -0,42321 | 3,9914 | -12,934 | 32,264 | -55,045 | 97,527 | 48,985 | -417,90 | 544,94 | -400,61 | 73,582 | -502,67 | 1570,1 | -1603,6 | 726,00 |
| 0,4 | -0,33352 | 2,9995 | -10,286 | 32,655 | -52,266 | 77,326 | 58,941 | -423,00 | 533,21 | -339,84 | 118,14 | -664,96 | 1697,7 | -1619,7 | 663,26 |
| 0,6 | -0,30948 | 2,8003 | -9,5622 | 34,712 | -55,960 | 76,158 | 71,366 | -456,15 | 575,24 | -359,60 | 160,53 | -834,97 | 1925,0 | -1779,3 | 730,44 |
| 0,4 | 0,25 | -0,86113 | 6,4825 | -26,193 | 66,247 | -53,601 | 157,06 | 40,970 | -843,17 | 785,80 | -465,29 | 174,01 | -871,06 | 3314,0 | -2826,7 | 709,26 |
| 0,3 | -0,73061 | 5,5413 | -22,005 | 59,199 | -58,692 | 134,97 | -1,5781 | -617,30 | 679,83 | -449,07 | 211,52 | -687,92 | 2279,6 | -2125,9 | 735,18 |
| 0,4 | -0,60162 | 4,5507 | -18,156 | 63,192 | -67,979 | 112,49 | 18,615 | -673,41 | 776,93 | -426,24 | 285,27 | -989,49 | 2667,8 | -2459,2 | 807,47 |
| 0,6 | -0,57899 | 4,5728 | -17,102 | 67,982 | -81,364 | 118,27 | 48,715 | -765,12 | 914,01 | -520,83 | 373,96 | -1372,6 | 3247,2 | -2940,0 | 1065,9 |
| 0,5 | 0,25 | -1,3214 | 9,5559 | -45,131 | 104,67 | -15,102 | 249,47 | -141,42 | -1095,6 | 690,07 | -578,42 | 580,63 | -981,97 | 4186,2 | -2962,5 | 577,38 |
| 0,3 | -1,1574 | 10,160 | -40,677 | 84,342 | -46,000 | 245,81 | -122,69 | -817,84 | 746,59 | -757,38 | 486,93 | -792,73 | 2936,8 | -2546,9 | 1104,5 |
| 0,4 | -1,0048 | 9,4354 | -35,565 | 96,587 | -77,249 | 222,29 | -98,927 | -965,68 | 1041,3 | -794,94 | 620,85 | -1294,1 | 3772,6 | -3460,3 | 1388,9 |
| 0,6 | -1,0283 | 10,722 | -33,493 | 100,13 | -113,86 | 233,48 | -16,055 | -1152,6 | 1384,9 | -987,51 | 748,11 | -2059,9 | 4999,1 | -4627,6 | 1942,6 |

Таблица В.2 – Значения констант … при различных нормированных диаметрах и нормированных толщинах (для тензорозетки тип A)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,3 | 0,25 | -0,81935 | 4,5117 | -17,246 | 67,304 | -96,745 | 116,53 | 91,277 | -740,10 | 936,13 | -504,90 | 280,40 | -1341,5 | 3092,4 | -2840,9 | 1015,8 |
| 0,3 | -0,74914 | 3,7788 | -15,709 | 65,387 | -92,239 | 105,60 | 84,631 | -705,89 | 887,74 | -460,17 | 287,11 | -1300,0 | 2949,9 | -2683,3 | 932,16 |
| 0,4 | -0,67123 | 3,0908 | -14,385 | 64,586 | -88,974 | 96,250 | 83,440 | -687,04 | 853,94 | -420,74 | 278,49 | -1272,2 | 2865,8 | -2576,3 | 857,17 |
| 0,6 | -0,63325 | 2,7443 | -13,939 | 65,991 | -89,754 | 94,685 | 88,544 | -698,96 | 859,11 | -416,18 | 288,93 | -1326,1 | 2934,2 | -2597,6 | 849,09 |
| 0,4 | 0,25 | -1,4318 | 7,0383 | -28,826 | 123,90 | -142,05 | 171,92 | 41,965 | -1177,9 | 1430,8 | -688,95 | 627,82 | -2168,7 | 4991,2 | -4457,6 | 1390,4 |
| 0,3 | -1,3121 | 5,9502 | -26,529 | 122,80 | -139,29 | 157,36 | 23,186 | -1127,4 | 1388,1 | -630,86 | 636,98 | -2076,0 | 4755,0 | -4281,6 | 1275,4 |
| 0,4 | -1,1861 | 5,0037 | -24,770 | 123,93 | -138,72 | 147,12 | 19,824 | -1120,1 | 1377,4 | -593,27 | 618,55 | -2025,9 | 4684,4 | -4223,2 | 1207,4 |
| 0,6 | -1,1344 | 4,6049 | -24,295 | 127,87 | -143,44 | 149,02 | 31,481 | -1164,1 | 1421,0 | -613,78 | 645,89 | -2160,3 | 4906,0 | -4368,1 | 1255,9 |
| 0,5 | 0,25 | -2,2249 | 12,940 | -51,464 | 207,84 | -194,88 | 321,16 | -206,86 | -1708,0 | 2055,1 | -1247,9 | 1391,8 | -3051,0 | 7262,8 | -6537,9 | 2372,9 |
| 0,3 | -2,0518 | 11,501 | -48,586 | 210,93 | -197,56 | 303,76 | -251,77 | -1648,8 | 2048,4 | -1178,3 | 1422,3 | -2897,3 | 6944,1 | -6415,4 | 2227,4 |
| 0,4 | -1,8786 | 10,378 | -46,711 | 215,95 | -202,55 | 295,51 | -259,17 | -1672,0 | 2093,4 | -1161,2 | 1398,6 | -2829,0 | 6944,8 | -6500,4 | 2212,3 |
| 0,6 | -1,8255 | 10,117 | -46,261 | 222,59 | -214,20 | 302,23 | -231,58 | -1770,2 | 2210,3 | -1223,0 | 1443,0 | -3095,2 | 7432,5 | -6888,6 | 2366,5 |

Таблица В.3 – Значения констант … при различных нормированных диаметрах и нормированных толщинах (для тензорозетки тип B)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,3 | 0,25 | -0,53572 | 5,3152 | -17,278 | 40,400 | -66,103 | 134,59 | 86,202 | -623,53 | 753,15 | -561,74 | 38,819 | -675,77 | 2478,2 | -2470,2 | 1064,6 |
| 0,3 | -0,45097 | 4,2573 | -13,901 | 35,231 | -59,033 | 104,84 | 48,524 | -447,70 | 584,92 | -430,29 | 83,658 | -534,94 | 1680,1 | -1720,9 | 778,88 |
| 0,4 | -0,35759 | 3,2277 | -11,127 | 35,821 | -56,440 | 83,703 | 59,486 | -455,93 | 576,52 | -367,53 | 131,92 | -712,44 | 1828,6 | -1751,3 | 716,70 |
| 0,6 | -0,33297 | 3,0281 | -10,347 | 37,959 | -60,513 | 82,539 | 72,429 | -490,64 | 622,08 | -389,50 | 177,37 | -893,25 | 2070,1 | -1923,7 | 790,75 |
| 0,4 | 0,25 | -0,91608 | 6,9107 | -28,299 | 72,556 | -56,847 | 170,77 | 30,441 | -900,09 | 837,73 | -508,56 | 206,84 | -919,25 | 3529,7 | -3014,5 | 772,86 |
| 0,3 | -0,77905 | 5,9751 | -23,957 | 64,735 | -62,541 | 148,26 | -12,421 | -660,35 | 727,54 | -495,75 | 242,21 | -727,70 | 2433,8 | -2276,3 | 809,03 |
| 0,4 | -0,64624 | 4,9697 | -19,895 | 69,346 | -73,272 | 124,44 | 9,0448 | -724,57 | 839,22 | -472,20 | 323,50 | -1056,9 | 2868,7 | -2657,5 | 889,78 |
| 0,6 | -0,62400 | 5,0253 | -18,719 | 74,219 | -87,945 | 130,45 | 41,377 | -821,54 | 988,32 | -573,93 | 417,45 | -1466,3 | 3488,6 | -3179,9 | 1170,0 |
| 0,5 | 0,25 | -1,4114 | 10,812 | -49,940 | 110,74 | -14,494 | 285,79 | -168,11 | -1162,5 | 728,02 | -708,89 | 653,51 | -1017,5 | 4423,1 | -3138,7 | 772,27 |
| 0,3 | -1,2463 | 11,811 | -45,321 | 86,466 | -49,406 | 282,24 | -132,03 | -871,10 | 803,67 | -897,03 | 526,97 | -829,69 | 3119,5 | -2737,7 | 1324,0 |
| 0,4 | -1,0907 | 11,079 | -39,886 | 100,13 | -83,614 | 256,85 | -108,03 | -1034,1 | 1127,3 | -935,42 | 675,37 | -1374,0 | 4039,2 | -3745,1 | 1628,2 |
| 0,6 | -1,1267 | 12,685 | -37,385 | 102,24 | -124,72 | 266,36 | -14,381 | -1229,9 | 1505,7 | -1132,1 | 803,57 | -2199,0 | 5355,9 | -5025,4 | 2210,9 |

Таблица В.4 – Значения констант … при различных нормированных диаметрах и нормированных толщинах (для тензорозетки тип B)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,3 | 0,25 | -0,89677 | 4,8494 | -19,335 | 78,029 | -109,84 | 129,21 | 102,15 | -848,56 | 1065,9 | -558,01 | 333,68 | -1559,6 | 3558,9 | -3244,7 | 1125,6 |
| 0,3 | -0,82656 | 4,1052 | -17,722 | 75,869 | -105,03 | 118,11 | 93,925 | -810,01 | 1013,4 | -513,15 | 339,00 | -1504,2 | 3394,1 | -3070,8 | 1042,0 |
| 0,4 | -0,74844 | 3,4118 | -16,342 | 74,913 | -101,68 | 108,71 | 91,963 | -788,43 | 977,55 | -473,70 | 327,45 | -1465,4 | 3293,9 | -2953,7 | 966,20 |
| 0,6 | -0,71045 | 3,0646 | -15,870 | 76,258 | -102,51 | 107,45 | 96,696 | -798,97 | 982,04 | -470,98 | 337,03 | -1515,6 | 3355,6 | -2971,0 | 960,79 |
| 0,4 | 0,25 | -1,5639 | 7,6547 | -32,659 | 144,81 | -162,52 | 193,58 | 36,672 | -1357,5 | 1642,3 | -772,78 | 755,51 | -2527,4 | 5774,9 | -5132,7 | 1560,9 |
| 0,3 | -1,4431 | 6,5384 | -30,225 | 143,31 | -159,23 | 178,59 | 14,061 | -1297,3 | 1591,8 | -712,70 | 763,30 | -2408,2 | 5489,8 | -4923,9 | 1440,3 |
| 0,4 | -1,3164 | 5,5796 | -28,367 | 144,26 | -158,60 | 168,31 | 8,6846 | -1285,1 | 1578,5 | -675,67 | 738,89 | -2333,3 | 5386,0 | -4849,1 | 1372,3 |
| 0,6 | -1,2647 | 5,1826 | -27,834 | 148,15 | -163,58 | 170,88 | 19,835 | -1328,0 | 1623,1 | -701,14 | 764,30 | -2461,2 | 5599,8 | -4993,8 | 1430,4 |
| 0,5 | 0,25 | -2,4244 | 14,878 | -59,432 | 238,69 | -222,82 | 376,01 | -249,92 | -1971,2 | 2365,2 | -1470,6 | 1656,1 | -3565,0 | 8427,8 | -7561,6 | 2790,7 |
| 0,3 | -2,2485 | 13,396 | -56,388 | 241,36 | -225,01 | 358,14 | -302,68 | -1895,5 | 2348,7 | -1398,4 | 1686,5 | -3365,9 | 8024,0 | -7392,8 | 2635,7 |
| 0,4 | -2,0735 | 12,265 | -54,401 | 245,95 | -229,91 | 350,07 | -313,44 | -1910,0 | 2390,5 | -1383,9 | 1649,7 | -3247,1 | 7959,3 | -7451,8 | 2624,6 |
| 0,6 | -2,0213 | 12,042 | -53,843 | 252,01 | -241,96 | 357,51 | -284,58 | -2005,7 | 2509,4 | -1452,2 | 1686,6 | -3502,2 | 8433,8 | -7841,1 | 2792,6 |

Таблица В.5 – Значения констант … при различных нормированных диаметрах и нормированных толщинах (для тензорозетки тип C)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,3 | 0,25 | -0,74676 | 5,5110 | -19,162 | 53,633 | -83,768 | 122,48 | 80,228 | -578,03 | 721,79 | -462,44 | 165,72 | -832,14 | 1996 | -1858,9 | 767,34 |
| 0,3 | -0,71128 | 5,2397 | -18,336 | 53,155 | -82,495 | 118,29 | 80,367 | -571,87 | 713,24 | -452,92 | 172,5 | -849,24 | 1995,9 | -1845,5 | 758,33 |
| 0,4 | -0,68292 | 5,0350 | -17,635 | 52,553 | -81,478 | 115,32 | 79,251 | -563,24 | 704,54 | -447,16 | 177,41 | -857,27 | 1984,2 | -1828,4 | 753,09 |
| 0,6 | -0,66901 | 4,9500 | -17,222 | 52,025 | -81,181 | 114,45 | 77,051 | -554,45 | 699,01 | -447,51 | 178,83 | -852,81 | 1962,6 | -1813,3 | 754,47 |
| 0,4 | 0,25 | -1,3720 | 8,8397 | -34,455 | 103,88 | -113,26 | 187,08 | 22,917 | -932,90 | 1083,8 | -631,25 | 390,78 | -1266,5 | 3189,7 | -2901,5 | 1028,7 |
| 0,3 | -1,3180 | 8,5518 | -33,190 | 103,65 | -114,24 | 183,51 | 26,465 | -935,13 | 1092,8 | -636,49 | 405,33 | -1318,5 | 3241,2 | -2938,5 | 1054,1 |
| 0,4 | -1,2739 | 8,3600 | -32,113 | 102,91 | -115,37 | 182,42 | 27,996 | -930,30 | 1098,8 | -650,61 | 417,79 | -1358,4 | 3269,9 | -2964,1 | 1090,2 |
| 0,6 | -1,2528 | 8,3353 | -31,423 | 101,85 | -116,91 | 184,01 | 26,776 | -919,36 | 1102,6 | -669,54 | 423,30 | -1371,0 | 3263,6 | -2973,7 | 1125,9 |
| 0,5 | 0,25 | -2,3772 | 20,931 | -69,519 | 145,11 | -138,14 | 391,78 | -108,01 | -1342,0 | 1504,6 | -1274,0 | 779,32 | -1663,6 | 4524,6 | -4183,4 | 1929,9 |
| 0,3 | -2,3161 | 21,008 | -67,566 | 143,40 | -145,17 | 388,49 | -91,288 | -1358,8 | 1555,9 | -1299,7 | 793,05 | -1770,2 | 4666,6 | -4332,9 | 2009,7 |
| 0,4 | -2,2751 | 21,435 | -65,724 | 139,10 | -153,49 | 388,49 | -69,768 | -1365,1 | 1609,2 | -1340,1 | 798,96 | -1878,9 | 4795,3 | -4487,0 | 2112,0 |
| 0,6 | -2,2761 | 22,342 | -64,303 | 131,96 | -162,91 | 392,61 | -45,380 | -1356,5 | 1659,0 | -1390,3 | 790,32 | -1965,3 | 4880,3 | -4623,1 | 2220,1 |

Таблица В.6 – Значения констант … при различных нормированных диаметрах и нормированных толщинах (для тензорозетки тип C)

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 0,3 | 0,25 | -0,90032 | 2,6954 | -19,744 | 92,122 | -108,64 | 100,25 | 77,251 | -761,88 | 895,25 | -347,46 | 299,18 | -1258,8 | 2728,4 | -2319,0 | 607,29 |
| 0,3 | -0,93710 | 2,8677 | -20,187 | 92,952 | -110,83 | 104,13 | 78,585 | -770,68 | 909,86 | -363,41 | 301,11 | -1269,0 | 2755,4 | -2350,7 | 632,15 |
| 0,4 | -0,98058 | 3,0652 | -20,723 | 93,941 | -113,43 | 108,71 | 80,350 | -781,47 | 927,18 | -381,95 | 303,71 | -1282,1 | 2788,4 | -2388,4 | 660,82 |
| 0,6 | -1,0250 | 3,2520 | -21,284 | 94,966 | -116,00 | 113,26 | 82,524 | -793,07 | 944,37 | -399,84 | 306,53 | -1296,8 | 2823,6 | -2425,9 | 688,02 |
| 0,4 | 0,25 | -1,4956 | 4,7720 | -36,436 | 184,73 | -172,99 | 168,78 | -33,803 | -1306,6 | 1512,6 | -537,05 | 744,60 | -2159,1 | 4769,7 | -4054,4 | 941,66 |
| 0,3 | -1,5604 | 5,0519 | -37,003 | 185,75 | -176,29 | 174,15 | -33,336 | -1315,4 | 1532,8 | -560,0 | 742,76 | -2155,6 | 4783,4 | -4089,9 | 977,09 |
| 0,4 | -1,6374 | 5,3747 | -37,679 | 186,87 | -180,13 | 180,45 | -32,543 | -1325,2 | 1555,0 | -586,12 | 742,43 | -2156,4 | 4801,1 | -4128,6 | 1016,0 |
| 0,6 | -1,7164 | 5,6717 | -38,417 | 188,15 | -183,96 | 187,20 | -31,703 | -1335,8 | 1577,2 | -613,63 | 742,80 | -2157,9 | 4820,0 | -4166,6 | 1056,4 |
| 0,5 | 0,25 | -2,2042 | 19,031 | -78,938 | 266,63 | -255,70 | 450,10 | -182,95 | -2084,0 | 2485,6 | -1562,7 | 1525,4 | -3665,9 | 8119,1 | -7141,7 | 2621,2 |
| 0,3 | -2,2973 | 19,035 | -79,442 | 271,03 | -258,21 | 453,96 | -205,66 | -2073,8 | 2485,4 | -1573,9 | 1513,0 | -3531,6 | 7952,4 | -7059,1 | 2619,6 |
| 0,4 | -2,4142 | 19,139 | -79,903 | 276,41 | -263,43 | 458,14 | -230,10 | -2068,1 | 2500,7 | -1588,3 | 1509,8 | -3413,4 | 7808,2 | -7009,4 | 2625,4 |
| 0,6 | -2,5374 | 19,226 | -80,368 | 281,78 | -268,54 | 462,54 | -253,72 | -2062,9 | 2513,8 | -1602,5 | 1515,2 | -3320,2 | 7687,8 | -6963,4 | 2629,3 |

Приложение Г

(обязательное)

Определение значений поправочных коэффициентов *A, B, C, F, G* для заданного шага сверления методом конечных элементов

Г.1 Определение коэффициентов проводится на основе трехмерной модели с несквозным отверстием диаметром, равным диаметру отверстия при сверлении, и глубиной, равной глубине заданного шага сверления. Размер модели: по ширине и глубине – не менее 30 мм; по высоте – в соответствии с толщиной исследуемого объекта, для которого проводится определение остаточных напряжений.

Г.2 Упругие свойства материала модели и принимаются равными материалу исследуемого объекта, на котором проводится определение остаточных напряжений.

Г.3 Создают сетку конечных элементов. Размер элементов на боковой поверхности отверстия ограничивается максимальным размером - не более 0,001 мм.

Г.4 Проводят расчет напряженно-деформированного состояния модели для двух вариантов двухосных нагрузок, приложенных к боковым сторонам (см. рис. Г.1): при двухосном растяжении; при двухосном растяжении-сжатии.

|  |  |
| --- | --- |
| *x*  *y*  *σ*  *σ*  *σ*  *σ* | *σ*  *σ*  *σ*  *σ*  *x*  *y* |
| а | б |

Рисунок Г.1 – Схема приложения нагрузок к боковым поверхностям моделей, соответствующих напряжению : а – двухосное растяжение; б – двухосное растяжение-сжатие. Вид в плоскости *xy* сверления отверстия; пунктиром отмечено отверстие

Г.5 По результатам расчетов на плоскости *xy* со стороны отверстия получают для заданного шага сверления значения модельных перемещений , , вдоль осей *x*, *y* и *z* соответственно:

1) при двухосном растяжении - , , ;

2) при двухосном растяжении-сжатии - , , .

Г.6 Значения поправочных коэффициентов *A, B, C, F, G* при заданный упругих свойствах материала исследуемого объекта, диаметру отверстия и шаге сверления вычисляют по формулам:

, (Г.1)

(Г.2)

(Г.3)

, (Г.4)

. (Г.5)

Г.7 Для модели глубиной и шириной 30 мм, высотой 10 мм, с характеристиками упругости  200 ГПа, , радиусом несквозного отверстия 2 мм и глубиной 0,05 мм пример графиков зависимости полученных поправочных коэффициентов от расстояния до центра отверстия представлен на рисунке Г.2.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  |  | |  |
| а | б | | в |
|  | |  | |
| г | | д | |

Рисунок Г.2 – Графики зависимости поправочных коэффициентов от расстояния до центра отверстия

УДК: 620.1:621.9.011 ОКС ОКП

Ключевые слова: напряжения остаточные, метод сверления отверстия, тензометрия, корреляция цифровых изображений

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Руководитель разработки,  начальник лаборатории № 630 |  | Н.О. Яковлев |
|  |  |  |
| **Исполнители:** |  |  |
|  |  |  |
| Ведущий инженер лаборатории № 630 |  | В.В. Автаев |
|  |  |  |
| Заместитель начальника лаборатории №630 |  | П.В. Шершак |
|  |  |  |
| Начальник сектора лаборатории №630 |  | Я.В. Автаева |
|  |  |  |
| Инженер лаборатории №630 |  | А.Д. Монахов |