ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ГОСТ Р 71316— 2024**

# Аддитивные технологии

# ИЗДЕЛИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

## Определение остаточных напряжений методом сверления отверстия

**Издание официальное**

**Москва**
**Российский институт стандартизации**
**2024**

gost.e-ecolog.ru

## Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 182 «Аддитивные технологии»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 28 марта 2024 г. № 376-ст

4 Настоящий стандарт соответствует стандарту АСТМ Е837-2020 «Стандартный метод испытаний для определения остаточных напряжений методом сверления отверстия с тензометрией» (ASTM E837-2020 «Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method», NEQ) в части оценки остаточных напряжений с помощью тензодатчиков

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном 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 Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2024

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

1 Область применения . . . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . . . 1
3 Термины и определения . . . . . 2
4 Обозначения . . . . . 2
5 Сущность метода . . . . . 4
6 Образцы для испытаний . . . . . 4
7 Оборудование для испытаний . . . . . 4
8 Подготовка к проведению испытаний . . . . . 5
8.1 Подготовка к измерениям деформаций с помощью тензодатчиков . . . . . 5
8.2 Подготовка к измерениям перемещений с помощью оптической системы корреляции цифровых изображений . . . . . 7
9 Проведение испытаний . . . . . 8
10 Обработка результатов . . . . . 9
10.1 Определение остаточных напряжений по измерениям деформаций, полученных с помощью тензодатчиков . . . . . 9
10.2 Определение остаточных напряжений по измерениям перемещений, полученных с помощью оптической системы корреляции цифровых изображений . . . . . 11
11 Протокол испытаний . . . . . 12
Приложение А (обязательное) Определение матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$ для однородных по глубине остаточных напряжений в тонкостенных исследуемых объектах . . . . . 14
Приложение Б (обязательное) Определение матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$ для однородных по глубине остаточных напряжений в массивных исследуемых объектах . . . . . 15
Приложение В (обязательное) Определение матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$ для однородных по глубине остаточных напряжений в исследуемых объектах переходной толщины . . . . . 16
Приложение Г (обязательное) Определение матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$, $\bar{c}$ для неоднородных по глубине остаточных напряжений в массивных исследуемых объектах . . . . . 17
Приложение Д (обязательное) Определение матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$, $\bar{c}$ для неоднородных по глубине остаточных напряжений в тонкостенных исследуемых объектах . . . . . 19
Приложение Е (обязательное) Определение матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$, $\bar{c}$ для неоднородных по глубине остаточных напряжений в исследуемых объектах переходной толщины . . . . . 20
Приложение Ж (обязательное) Определение значений поправочных коэффициентов $A$, $B$, $C$, $F$, $G$ для заданного шага сверления методом конечных элементов . . . . . 21
Приложение И (обязательное) Значения констант для определения однородных остаточных напряжений в объектах переходной толщины и массивных исследуемых объектах . . . . . 24
Приложение К (обязательное) Значения констант для определения неоднородных остаточных напряжений в объектах переходной толщины и массивных исследуемых объектах . . . . . 26

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Аддитивные технологии**

# ИЗДЕЛИЯ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДАМИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Определение остаточных напряжений методом сверления отверстия**

Additives technologies. Products made by additive technologies.
Determination of residual stresses by the hole-drilling method

**Дата введения — 2024—04—15**

## 1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на изделия из конструкционных изотропных или квазиизотропных линейно-упругих металлических и неметаллических материалов, изготовленные по аддитивным технологиям.

Настоящий стандарт может быть также применен для указанных материалов или изделий из них, 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. Метод применим для определения как однородных по глубине остаточных напряжений, не превышающих 50 % от предела текучести материала, так и неоднородных по глубине остаточных напряжений, не превышающих 80 % от предела текучести материала.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

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

ГОСТ 21616 Тензорезисторы. Общие технические условия

ГОСТ Р 54521 Статистические методы. Математические символы и знаки для применения в стандартах

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.

**Издание официальное**

## 3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **исследуемый объект:** Изделие, фрагмент изделия или образец, изготовленный в таких же условиях, из такой же партии сырья и по таким же требованиям нормативной документации, как и изделие.

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

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, статья 7]

Примечание — Допускается использование терминологического сокращения «тензорозетка».

3.4 **спекл (спекл-текстура):** Фрагмент хаотичной контрастной текстуры.

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, мм, и его размера на цифровом изображении, пикс.

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, статья 2.3.6]

3.10

**установка АП (аддитивная установка):** Часть системы АП, необходимая для выполнения цикла построения деталей, включающая аппаратную часть, программное обеспечение для настройки и контроля установки, а также периферийные приспособления, используемые для обслуживания установки.

[ГОСТ Р 57558—2017, статья 2.1.4]

## 4 Обозначения

В настоящем стандарте применены обозначения по ГОСТ Р 54521, а также следующие обозначения:

| | | |
|---|---|---|
| $Ra$ | — | параметр шероховатости поверхности исследуемого объекта (среднеарифметическое отклонение профиля), мкм; |
| $W$ | — | толщина исследуемого объекта, мм; |
| $D_0$ | — | номинальный или фактический диаметр отверстия, мм; |
| $D$ | — | диаметр измерения деформаций вокруг отверстия, мм; |
| $D_0/D$ | — | нормированный диаметр; |
| $W/D$ | — | 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;

$\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$ — деформации, зафиксированные на заданной ступени сверления отверстия по глубине;

$h_j$ — глубина сверления отверстия на $j$-й ступени, мм;

$H_k$ — глубина $k$-й ступени остаточных напряжений, оказывающих влияние на $j$-ю ступень сверления;

$p_j$ — изотропные деформации после сверления на $j$-й ступени;

$q_j$, $t_j$ — сдвиговые деформации после сверления на $j$-й ступени;

$P_j$ — изотропные напряжения после сверления на $j$-й ступени, МПа;

$Q_j$, $T_j$ — касательные напряжения после сверления на $j$-й ступени, МПа;

$E$ — модуль упругости материала исследуемого объекта, ГПа;

$\mu$ — коэффициент Пуассона материала исследуемого объекта;

$f_0$ — поправка на диаметр отверстия;

$f_н$ — поправка на толщину исследуемого объекта;

$a_+, a_0, a_-, b_+, b_0, b_-$ — аппроксимирующие константы на малую толщину исследуемого объекта для трех ближайших значений нормированного диаметра, ближайших к измеренному на исследуемом объекте;

$C_1^a ... C_{15}^a$, $C_1^b ... C_{15}^b$ — аппроксимирующие константы для определения калибровочных коэффициентов $\overline{a}$ и $\overline{b}$ соответственно;

$\overline{a}$, $\hat{\boldsymbol{a}}$ — матрицы калибровочных коэффициентов для изотропных напряжений;

$\overline{b}$, $\hat{\boldsymbol{b}}$ — матрицы калибровочных коэффициентов для касательных напряжений;

$\overline{c}$ — матрица регуляризации;

$\alpha_P$, $\alpha_Q$, $\alpha_T$ — параметры сглаживающей регуляризации;

$n$ — суммарное количество комбинаций деформаций $p_j$, $q_j$, $t_j$ на $j$-й ступени;

$\sigma_x$, $\sigma_y$ — нормальные напряжения по осям $x$ и $y$ соответственно, МПа;

$\tau_{xy}$ — касательные напряжения в плоскости $xy$, МПа;

$\sigma_{max}$, $\sigma_{min}$ — главные максимальные и минимальные напряжения соответственно, МПа;

$\beta$ — угол между осью $x$ (направление тензодатчика 1) и максимальными главными напряжениями, рад;

$u$, $v$, $w$ — перемещения спеклов по осям $x$, $y$ и $z$ соответственно, мм;

$\theta$ — угол относительно оси $x$ на полях перемещений (полярная координата перемещений по полям), радиан;

$\rho$ — расстояние от центра отверстия на полях перемещений (полярная координата перемещений по полям), мм;

$A$, $B$, $C$, $F$, $G$ — поправочные коэффициенты (вектора) на несквозное отверстие для определения остаточных напряжений по полям перемещений;

$a_{11}$, $a_{12}$, $a_{13}$, $a_{21}$, $a_{22}$, $a_{23}$, $a_{31}$, $a_{32}$, $a_{33}$ — коэффициенты пропорциональности, связывающие поля перемещений с остаточными напряжениями;

$\overline{d}$ — вектор перемещений $u$, $v$, $w$;

$\overline{Dj}$ — вектор кумулятивного суммирования перемещений вектора $\overline{d}$;

| | | |
|---|---|---|
| $M$ | — | матрица коэффициентов пропорциональности (дополнительное обозначение подстрочного индекса введено для обозначения шага сверления); |
| $Z$ | — | нулевая матрица с размерами матрицы $M$. |

## 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 определяют с помощью численных расчетов.

Примечание — Рекомендуемым методом для оценки распределения неоднородных остаточных напряжений является метод тензометрии. Метод корреляции цифровых изображений используют при необходимости, в качестве дополнительного к методу тензометрии.

## 6 Образцы для испытаний

6.1 Определение остаточных напряжений проводят 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, технологических загрязнений или ржавчины.

6.3 Поверхность исследуемого объекта должна быть без сколов, трещин, расслоений и других дефектов, заметных невооруженным глазом. Рихтовка или другой вид механической правки не допускается. При необходимости правки поверхности или уменьшения шероховатости поверхности исследуемого объекта рекомендуется применять химическое травление. Использование механической обработки не рекомендуется, если в нормативных документах на исследуемый объект отсутствуют иные указания. При использовании механической обработки поверхности соответствующую отметку заносят в протокол испытаний.

Примечание — Механическая обработка поверхности приводит к появлению дополнительных остаточных напряжений, которые искажают картину распределения изначально присутствующих остаточных напряжений в исследуемом объекте.

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

## 7 Оборудование для испытаний

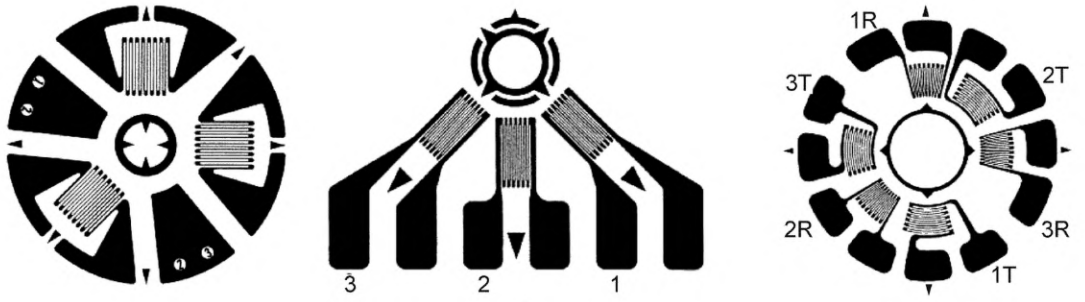
7.1 Сверление отверстий проводят на оборудовании, обеспечивающем скорость вращения режущего инструмента не менее 20 000 об/мин. Рекомендуется использовать оборудование со скоростью вращения режущего инструмента более 40 000 об/мин.

Примечание — Сверление приводит к появлению в поверхностных слоях материала у отверстия пластических деформаций, которые могут повлиять на картину распределения изначально присутствующих остаточных напряжений в исследуемом объекте. При малых скоростях вращения режущего инструмента данный эффект проявляется интенсивнее, чем при больших скоростях.

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

7.3 Измерение деформаций в зоне сверления отверстия проводят 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 0°/135°/270° (тип А) или 0°/45°/90° (типы В, С) (см. рисунок 1).




а — тип А; б — тип В; 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 Т — 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.

Видеокамеры оптических систем должны обеспечивать в течение всего испытания съемку при постоянных диафрагме и фокусном расстоянии с записью изображений в формате без сжатия или в формате сжатия без потерь (например, формат TIFF). Объективы видеокамер должны удовлетворять следующим требованиям: дисторсия по краям изображения — не более 5 % относительно центра изображения; коэффициент пропускания в диапазоне длин световых волн — не менее 85 %.

При регистрации изображений в процессе испытаний не допускается применение автоматических функций баланса белого, компенсации засветки, подавления цифрового шума.

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

7.4 Контроль позиции режущего инструмента относительно центра предполагаемого отверстия, контроль геометрии отверстия проводят с помощью оптического микроскопа. Рекомендуется использовать инструментальный микроскоп ИМЦ 100 × 50, 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) в установленном порядке 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 А и В) или менее 0,6*D* (для тензорозетки типа С);
- переходной толщины — при толщине от 0,25*D* до 0,6*D* (для тензорозеток типов А и В) или от 0,6*D* до 1,3*D* (для тензорозетки типа С);
- массивный — при толщине более 0,6*D* (для тензорозеток типов А и В) 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.

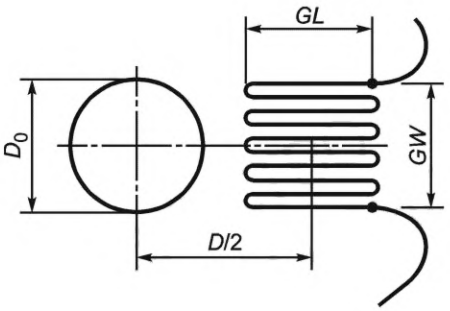



Рисунок 2 — Схема расположения тензодатчиков относительно предполагаемого места сверления отверстия

В таблице 1 представлены размеры тензорозеток и значения ступени глубины при сверлении отверстия номинальным диаметром $D_0$, равным 2 мм. Допускается сверление отверстия номинальным диаметром другого размера, с пропорциональным изменением всех размеров тензорозеток и ступени сверления, приведенных в таблице 1.

Таблица 1 — Выбор размеров тензорозеток и ступени сверления

| Тип тензорозетки | $D_0$, мм | $D$, мм | $GL$, мм | $GW$, мм | Ступень (глубина) сверления, мм | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | Однородные напряжения | Неоднородные напряжения |
| Тип А | 2 | 5,13 | 1,59 | 1,59 | 0,10** | 0,05 |
| Тип В | | | | 1,14 | | |
| Тип С | | 4,32 | 0,76 | 30°* | | |

*Угол, ограничивающий сектор измерительной части тензодатчика.

**Для тонкостенного исследуемого объекта сверление проводят на одну ступень, равную меньшему значению из двух значений: 0,2$D$ или толщине исследуемого объекта.

8.1.2 Для наклеивания тензорозеток рекомендуется использовать клей на основе цианокрилата. При этом рекомендуется, чтобы параметр шероховатости поверхности $Ra$ в месте наклеивания был в пределах от 2,0 до 4,0 мкм. При использовании клея на основе метилметакрилата рекомендуется, чтобы $Ra$ в месте наклеивания был в пределах от 3,0 до 10,0 мкм; клея на основе эпоксидной смолы — от 2,0 до 10,0 мкм; клея на основе эпоксидной смолы горячего отверждения — от 2,0 до 4,0 мкм.

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

При использовании тензорозеток типов А и С наклеивание проводят на расстоянии не менее 1,5$D$ от края исследуемого объекта или от места другого сверления отверстия. При применении тензорозетки типа В наклеивание выполняют 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 осуществляют контроль их соосности с обеспечением отклонения осей не более ±0,004$D$.

8.1.5 Для тензорозеток типов А и В обнуляют текущие значения деформаций $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$ от трех тензодатчиков.

Для тензорозетки типа С проводят обнуление текущих значений деформаций 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 принимают равными деформациям $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$.

### 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. Рекомендуемое соотношение белого/черного на спекл-текстуре — 1:1, размер контрастных точек на цифровом изображении — 3—5 пикс. Не допускается нанесение спеклов с повторяющейся периодической текстурой. Пример спеклов представлен на рисунке 3.

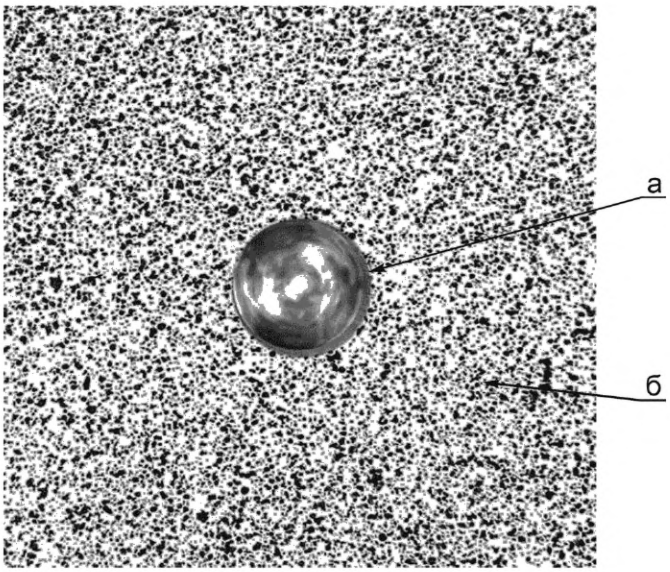



Рисунок 3 — Пример спеклов, нанесенных на поверхность исследуемого объекта в зоне сверления отверстия: а — несквозное отверстие после сверления; б — спекл-текстура на поверхности

Зона предполагаемого отверстия должна быть расположена на расстоянии не менее $4D_0$ 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 в момент съемки изображений.

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

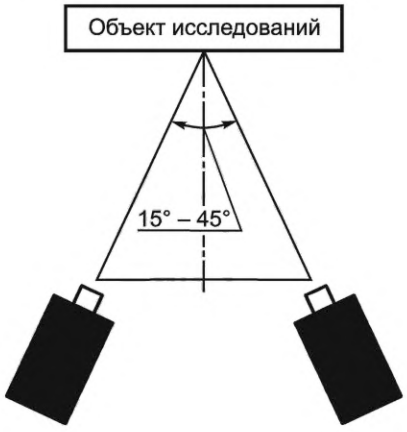



Рисунок 4 — Схематичное расположение видеокамер относительно зоны предполагаемого сверления отверстия

8.2.4 Коррекцию оптических искажений объективов (дисторсии), а также определение их взаимного расположения относительно зоны предполагаемого сверления отверстия проводят с помощью программного обеспечения для отслеживания и определения перемещений и калибровочной сетки (мишени), входящей в состав поверенных средств измерений.

8.2.5 Калибровочную сетку (мишень) 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 (мишени) заданного размера. При съемке каждого следующего изображения пространственное расположение калибровочной сетки (мишени) 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 принимают за начальное (определяют равным нулю).

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

Примечание — Допускается сверление отверстия на большую или меньшую глубину, чем ступень (глубина) сверления по 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 по 9.3.1, 9.3.2.

9.3.1 При использовании тензодатчиков выдержку проводят до стабилизации значений деформаций.

9.3.2 При применении оптической системы измерения полей перемещений проводят выдержку не менее 10 с.

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

9.4.1 При использовании тензодатчиков в составе тензорозеток типов А и В проводят фиксацию трех значений деформации $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$ для текущего значения глубины (ступени).

9.4.2 При применении тензорозеток типа С фиксацию каждого из трех значений деформаций $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$ для текущего значения глубины (ступени) определяют по двум противоположно расположенным тензодатчикам, соединенным с помощью полумостовой схемы подключения.

9.4.3 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 8.2.7.

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

При определении неоднородных остаточных напряжений процедуру испытания повторяют по 9.2—9.4 до тех пор, пока не будут выполнены следующие условия:

- до достижения глубины отверстия, равной 0,2*D* (для тензорозеток типа А или В) или равной 0,24*D* (для тензорозетки типа С);
- до достижения глубины, равной 0,6 от толщины *W* (для тензорозеток типа А или В) или равной 0,5 от толщины *W* (для тензорозетки типа С) исследуемого объекта.

9.6 При определении остаточных напряжений с помощью оптической системы корреляции цифровых изображений проводят испытания по 9.2—9.4 до достижения глубины отверстия, равной $0,5D_0$:

- одним шагом сверления (при определении однородных остаточных напряжений);
- пошаговым сверлением (при определении неоднородных остаточных напряжений).

9.7 После окончания сверления фиксируют с помощью оптического микроскопа фактический диаметр отверстия $D_0$ 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.

9.8 При использовании тензодатчиков для измерения деформаций проводят контроль соосности отверстия относительно диаметра измерения деформаций $D$. Допускаемое отклонение от соосности — не более $\pm 0,004D$.

## 10 Обработка результатов

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

10.1.1 Измеренные значения деформаций $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$,$\varepsilon_3$ контролируют по их убыванию или возрастанию по глубине. Результаты измерений не используют 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 $p_j$, $q_j$, $t_j$ для каждой $j$-й ступени сверления отверстия в соответствии с формулами:

$$p_j = (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)_j / 2, \tag{1}$$

$$q_j = (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)_j / 2, \tag{2}$$

$$t_j = (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)_j / 2. \tag{3}$$

10.1.3 Вычисляют значения матриц калибровочных коэффициентов $\overline{a}$ и $\overline{b}$ и матрицы регуляризации $\overline{c}$ для каждой $j$-й ступени сверления отверстия. Процедура вычислений представлена в приложениях А—Е.

10.1.4 При определении однородных по глубине остаточных напряжений вычисляют комбинации напряжений $P_j$, $Q_j$, $T_j$ в соответствии с формулами:

$$P_j = 10^3 \frac{E}{(1+\mu)} \frac{\Sigma(\overline{a} p_j)}{\Sigma(\overline{a}^2)}, \tag{4}$$

$$Q_j = -10^3 E \frac{\Sigma(\overline{b} q_j)}{\Sigma(\overline{b}^2)}, \tag{5}$$

$$T_j = -10^3 E \frac{\Sigma(\overline{b} q_j)}{\Sigma(\overline{b}^2)}. \tag{6}$$

10.1.5 При определении неоднородных по глубине остаточных напряжений комбинации напряжений $P_j$, $Q_j$, $T_j$ вычисляют с помощью решения систем линейных уравнений в виде:

$$(\overline{a}^T \overline{a} + \alpha_P \overline{c}^T \overline{c}) P_j = 10^3 \frac{E}{(1+\mu)} \overline{a}^T p_j, \tag{7}$$

$$(\overline{b}^T \overline{b} + \alpha_Q \overline{c}^T \overline{c}) Q_j = 10^3 E \overline{b}^T q_j, \tag{8}$$

$$(\overline{b}^T \overline{b} + \alpha_T \overline{c}^T \overline{c}) T_j = 10^3 E \overline{b}^T t_j. \tag{9}$$

Примечания

1 Обозначение «$T$» в верхнем индексе матриц $\overline{a}$, $\overline{b}$ или $\overline{c}$ — операция транспонирования.

2 Рекомендуемые начальные значения сглаживающих параметров $\alpha_P$, $\alpha_Q$, $\alpha_T$ для регуляризации — в интервале от $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-6}$.

Вычисляют стандартное отклонение комбинаций деформации $p_j$, $q_j$, $t_j$ по формулам:

$$p_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{\left(p_j - 3p_{j+1} + 3p_{j+2} - p_{j+3}\right)^2}{20(n-3)}, \tag{10}$$

$$q_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(q_j - 3q_{j+1} + 3q_{j+2} - q_{j+3})^2}{20(n-3)}, \tag{11}$$

$$t_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(t_j - 3t_{j+1} + 3t_{j+2} - t_{j+3})^2}{20(n-3)}. \tag{12}$$

Вычисляют среднеквадратичное отклонение полученных после регуляризации комбинаций деформации $p_j$, $q_j$, $t_j$ от первоначальных по формулам:

$$p_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \left( p_j - \frac{(1+\mu)}{10^6 E} \overline{a} P_j \right)^2, \tag{13}$$

$$q_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \left( q_j - \frac{1}{10^6 E} \overline{b} Q_j \right)^2, \tag{14}$$

$$t_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} \left( t_j - \frac{1}{10^6 E} \overline{b} T_j \right)^2. \tag{15}$$

Если значения $p_{rms}^2$, $q_{rms}^2$, $t_{rms}^2$ отличаются более чем на ±5 % от соответствующих значений $p_{std}^2$, $q_{std}^2$, $t_{std}^2$, то определяют новые значения сглаживающих параметров $\alpha_P$, $\alpha_Q$, $\alpha_T$ по формулам (16)—(18) (обозначены с индексом «нов») и проводят повторные расчеты по формулам (7)—(15). Расчеты значений сглаживающих параметров прекращают при выполнении указанных выше условий.

$$(\alpha_P)_{нов} = \frac{p_{std}^2}{p_{rms}^2} \alpha_P, \tag{16}$$

$$(\alpha_Q)_{нов} = \frac{q_{std}^2}{q_{rms}^2} \alpha_Q, \tag{17}$$

$$(\alpha_T)_{нов} = \frac{t_{std}^2}{t_{rms}^2} \alpha_T. \tag{18}$$

10.1.6 Напряжения $\sigma_x$, $\sigma_y$, $\tau_{xy}$ на глубине $j$-й ступени сверления вычисляют по формулам:

$$(\sigma_x)_j = P_j - Q_j, \tag{19}$$

$$(\sigma_y)_j = P_j + Q_j, \tag{20}$$

$$(\tau_{xy})_j = T_j. \tag{21}$$

10.1.7 Главные напряжения $\sigma_{max}$ и $\sigma_{min}$ на глубине $j$-й ступени сверления вычисляют по формуле

$$(\sigma_{max})_j, \ (\sigma_{min})_j = P_j \pm \sqrt{Q_j^2 + T_j^2}. \tag{22}$$

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

$$\beta_j = \frac{1}{2}\text{arctg}\left(\frac{-T_j}{-Q_j}\right). \quad (23)$$

### 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. При этом систему координат *x*, *y*, *z* ориентируют таким образом, чтобы поверхность исследуемого объекта в зоне сверления находилась в плоскости *xy*, а направление сверления совпадало с направлением *z*.

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 *x*, *y*, *z* 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 *x*, *y*, *z* в полярные координаты θ, ρ, *z* соответственно и ограничивают область дальнейшего анализа полей перемещений по условию

$$0{,}6D \le \rho \le 3D. \quad (24)$$

10.2.5 С использованием метода конечных элементов определяют значения поправочных коэффициентов *A*, *B*, *C*, *F*, *G* для каждой ступени сверления. Процедура определения коэффициентов приведена в приложении Ж.

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:

$$a_{11} = [A + B\cos(2\theta)]\cos\theta - [C\sin(2\theta)]\sin\theta, \quad (25)$$

$$a_{12} = [A - B\cos(2\theta)]\cos\theta + [C\sin(2\theta)]\sin\theta, \quad (26)$$

$$a_{13} = 2\,[B\sin(2\theta)\cos\theta + C\cos(2\theta)\sin\theta], \quad (27)$$

$$a_{21} = [A + B\cos(2\theta)]\sin\theta + [C\sin(2\theta)]\cos\theta, \quad (28)$$

$$a_{22} = [A - B\cos(2\theta)]\sin\theta - [C\sin(2\theta)]\cos\theta, \quad (29)$$

$$a_{23} = 2\,[B\sin(2\theta)\sin\theta - C\cos(2\theta)\cos\theta], \quad (30)$$

$$a_{31} = F + G\cos(2\theta), \quad (31)$$

$$a_{32} = F - G\cos(2\theta), \quad (32)$$

$$a_{33} = 2\,G\sin(2\theta). \quad (33)$$

10.2.7 Определяют матрицы коэффициентов пропорциональности на каждой ступени сверления по формуле

$$M = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}. \quad (34)$$

10.2.8 Определяют вектор перемещений $\overline{d}$ для каждой ступени сверления по формуле

$$\overline{d} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

10.2.9 Определяют вектор кумулятивного суммирования перемещений $\overline{D}_j$ на всех ступенях сверления (от 1 до $j$-й ступени) по формуле

$$\overline{D}_j = \sum_{i=1}^{j} \overline{d}_i. \quad (36)$$

10.2.10 Напряжения $\sigma_x$, $\sigma_y$, $\tau_{xy}$ на всех ступенях сверления (от 1 до $j$-й ступени) вычисляют с помощью решения матричного уравнения, представленного в виде

$$\begin{Bmatrix} (\sigma_x)_1 \\ (\sigma_y)_1 \\ (\tau_{xy})_1 \\ \vdots \\ (\sigma_x)_j \\ (\sigma_y)_j \\ (\tau_{xy})_j \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} M_1 & Z & \cdots & Z \\ M_1 & M_2 & & Z \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ M_1 & M_2 & & M_j \end{pmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \overline{D}_1 \\ \overline{D}_2 \\ \vdots \\ \overline{D}_j \end{Bmatrix}. \quad (37)$$

10.2.11 Главные напряжения $\sigma_{max}$ и $\sigma_{min}$ на глубине всех ступеней сверления (от 1 до $j$-й ступени сверления) вычисляют по формуле

$$(\sigma_{max})_j,\ (\sigma_{min})_j = \frac{(\sigma_x)_j + (\sigma_y)_j}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{(\sigma_y)_j - (\sigma_x)_j}{2}\right)^2 + (\tau_{xy}^2)_j}. \quad (38)$$

10.2.12 Угол β между расположением оси $x$ (направление действия напряжений $\sigma_x$) и вектором действия главного максимального напряжения $\sigma_{max}$ вычисляют на глубине всех ступеней сверления (от 1 до $j$-й ступени сверления) по формуле

$$\beta_j = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\left(\frac{2(\tau_{xy})_j}{(\sigma_y)_j - (\sigma_x)_j}\right). \quad (39)$$

10.3 По результатам расчетов остаточных напряжений строят график зависимости напряжений $\sigma_{max}$ и $\sigma_{min}$ 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);
- средства измерений и испытаний и их заводские номера;
- значения напряжений $\sigma_{max}$, $\sigma_{min}$, угол $\beta$ по глубине сверления для исследуемого объекта;
- дату проведения испытаний;
- ссылку на настоящий стандарт;
- ФИО исполнителей.

11.2 Дополнительно протокол может содержать: графические изображения распределения деформаций $\varepsilon_1$, $\varepsilon_2$, $\varepsilon_3$ или поля перемещений на каждой ступени сверления отверстия для каждого исследуемого объекта, зон сверления исследуемого объекта или серий исследуемых объектов; фотографии исследуемого объекта.

## Приложение А
## (обязательное)

## Определение матриц калибровочных коэффициентов $\overline{a}$, $\overline{b}$ для однородных по глубине остаточных напряжений в тонкостенных исследуемых объектах

А.1 Поправку на диаметр отверстия $f_0$ определяют по формуле (А.1) для тензорозеток типа А, типа В или по формуле (А.2) для тензорозеток типа С:

$$f_0 = (D_0/D - 0{,}4)/0{,}1, \quad (А.1)$$

$$f_0 = (D_0/D - 0{,}48)/0{,}11, \quad (А.2)$$

А.1.2 Матрицы калибровочных коэффициентов $\overline{a}$, $\overline{b}$ определяют по следующим формулам:

$$\overline{a} = 0{,}5\, f_0(1 + f_0)a_+ + (1 + f_0)(1 - f_0)a_0 - 0{,}5\, f_0(1 - f_0)a_-, \quad (А.3)$$

$$\overline{b} = 0{,}5\, f_0(1 + f_0)b_+ + (1 + f_0)(1 - f_0)b_0 - 0{,}5\, f_0(1 - f_0)b_-, \quad (А.4)$$

Константы $a_+$, $a_0$, $a_-$, $b_+$, $b_0$, $b_-$ для тензорозеток типов А, В и С указаны в таблице А.1.

Таблица А.1 — Константы для формул (А.3) и (А.4)

| Тип тензорозетки | $a_+$ | $a_0$ | $a_-$ | $b_+$ | $b_0$ | $b_-$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| А | −0,090 | −0,160 | −0,250 | −0,289 | −0,478 | −0,664 |
| В | −0,096 | −0,170 | −0,266 | −0,331 | −0,542 | −0,743 |
| С | −0,265 | −0,471 | −0,736 | −0,554 | −0,806 | −0,877 |

**Приложение Б**
**(обязательное)**

## Определение матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$ для однородных по глубине остаточных напряжений в массивных исследуемых объектах

Б.1 Для каждой *j*-й ступени сверления определяют константы $C_1^a...C_5^a$, $C_1^b...C_5^b$. Для этого используют три группы констант:

- указанные в таблице И.1 (для тензорозетки типа А) или в таблице И.2 (для тензорозетки тип В) — для нормированной толщины *W/D*, равной 0,6;
- указанные в таблице И.3 (для тензорозетки типа С) — для нормированной толщины *W/D*, равной 1,3.

Б.2 Для каждой *j*-й ступени сверления по выбранным значениям для трех групп констант, соответствующих нормированным диаметрам:

- $D_0/D$, равными 0,3, 0,4 и 0,5 (для тензорозеток типов А и В);
- $D_0/D$, равными 0,36, 0,48 и 0,60 (для тензорозетки типа С),

определяют соответствующие значения констант $a_-$, $a_0$, $a_+$, $b_-$, $b_0$, $b_+$ по следующим формулам:

$$\left(a_{-/0/+}\right)_j = C_1^a\left(\frac{h_j}{D}\right) + C_2^a\left(\frac{h_j}{D}\right)^2 + C_3^a\left(\frac{h_j}{D}\right)^3 + C_4^a\left(\frac{h_j}{D}\right)^4 + C_5^a\left(\frac{h_j}{D}\right)^5, \quad (Б.1)$$

$$\left(b_{-/0/+}\right)_j = C_1^b\left(\frac{h_j}{D}\right) + C_2^b\left(\frac{h_j}{D}\right)^2 + C_3^b\left(\frac{h_j}{D}\right)^3 + C_4^b\left(\frac{h_j}{D}\right)^4 + C_5^b\left(\frac{h_j}{D}\right)^5. \quad (Б.2)$$

Примечание — Для значений $a_-$, $a_0$ и $a_+$ выбирают минимальное, среднее и максимальное значения нормированных диаметров $D_0/D$ из таблицы И.1, И.2 или И.3 соответственно.

Б.3 Матрицы калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$ для каждой *j*-й ступени сверления определяют по формулам (А.1)—(А.4).

## Приложение В
## (обязательное)

## Определение матриц калибровочных коэффициентов $\overline{a}$, $\overline{b}$ для однородных по глубине остаточных напряжений в исследуемых объектах переходной толщины

В.1 Для каждой *j*-й ступени сверления определяют константы $C_1^a...C_5^a$, $C_1^b...C_5^b$ по таблице И.1 (для тензорозетки типа А), И.2 (для тензорозетки типа Б) или И.3 (для тензорозетки типа С). Для этого используют три группы констант.

Для первой группы используют константы, соответствующие табличному значению (см. таблицы И.1, И.2 или И.3) нормированной толщины $(W/D)_0$, наиболее близкому к нормированной толщине *W/D* исследуемого объекта.

***Пример — Если нормированная толщина исследуемого объекта W/D равна 0,32, а измерения деформаций проводят с использованием тензорозетки типа А, тогда для первой группы констант выбирают значения $(W/D)_0$ , равные 0,3.***

Для второй и третьей групп констант используют табличные константы (см. таблицы И.1, И.2 или И.3) нормированных толщин, на шаг меньше и больше выбранного значения для первой группы.

***Пример — Если нормированная толщина $(W/D)_0$ равна 0,3, то для двух групп констант выбирают значения $(W/D)_-$, равное 0,25, и $(W/D)_+$, равное 0,4.***

В.2 Для каждой *j*-й ступени сверления определяют константы $a_-$, $a_0$, $a_+$, $b_-$, $b_0$, $b_+$, соответствующие нормированным толщинам $(W/D)_-$, $(W/D)_0$, $(W/D)_+$ по формулам (А.1)—(А.4).

В.3 По выбранным значениям для трех групп констант определяют поправку на толщину $f_н$ по формуле

$$f_н = \frac{\left(W/D - (W/D)_0\right)}{\left((W/D)_0 - (W/D)_-\right)}. \quad (В.1)$$

В.4 Матрицы калибровочных коэффициентов $\overline{a}$, $\overline{b}$ для каждой *j*-й ступени сверления определяют по формулам:

$$\overline{a}_j = (a_+)_j \frac{f_н(1+f_н)}{6} + (a_0)_j \frac{(1+f_н)(2-f_н)}{2} - (a_-)_j \frac{f_н(2-f_н)}{3}, \quad (В.2)$$

$$\overline{b}_j = (b_+)_j \frac{f_н(1+f_н)}{6} + (b_0)_j \frac{(1+f_н)(2-f_н)}{2} - (b_-)_j \frac{f_н(2-f_н)}{3}. \quad (В.3)$$

**Приложение Г**
**(обязательное)**

## Определение матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$, $\bar{c}$ для неоднородных по глубине остаточных напряжений в массивных исследуемых объектах

Г.1 Для каждой *j*-й ступени сверления определяют константы $C_1^a...C_{15}^a$, $C_1^b...C_{15}^b$. Для этого используют три группы констант:

- указанные в таблицах К.1 и К.2 (для тензорозетки типа А) или в таблицах К.3 и К.4 (для тензорозетки типа В) — для нормированной толщины *W/D*, равной 0,6;
- указанные в таблицах К.5 и К.6 (для тензорозетки типа С) — для нормированной толщины *W/D*, равной 1,3.

Г.2 Для каждой *j*-й ступени сверления отверстия и *k*-й ступени остаточных напряжений по выбранным значениям для трех групп констант, соответствующих нормированным диаметрам:

- $D_0/D$, равными 0,3, 0,4 и 0,5 (для тензорозеток типов А и В);
- $D_0/D$, равными 0,36, 0,48 и 0,60 (для тензорозетки типа С),

определяют соответствующие значения матриц калибровочных коэффициентов $\hat{a}$ и $\hat{b}$ по формулам (Г.1) и (Г.2) (индексы «−», «0», «+» обозначают минимальный, средний и максимальный нормированные диаметры $D_0/D$ для используемой тензорозетки):

$$\begin{aligned}\left(\hat{a}_{jk}\right)_{-/0/+} &= C_1^a\left(\frac{H_k}{D}\right) + C_2^a\left(\frac{h_j}{D}\right)^2 + C_3^a\left(\frac{H_k}{D}\right)\left(\frac{h_j}{D}\right) + C_4^a\left(\frac{H_k}{D}\right)^3 + C_5^a\left(\frac{H_k}{D}\right)^2\left(\frac{h_j}{D}\right) + \\ &+ C_6^a\left(\frac{H_k}{D}\right)\left(\frac{h_j}{D}\right)^2 + C_7^a\left(\frac{H_k}{D}\right)^4 + C_8^a\left(\frac{H_k}{D}\right)^3\left(\frac{h_j}{D}\right) + C_9^a\left(\frac{H_k}{D}\right)^2\left(\frac{h_j}{D}\right)^2 + C_{10}^a\left(\frac{H_k}{D}\right)\left(\frac{h_j}{D}\right)^3 + \\ &+ C_{11}^a\left(\frac{H_k}{D}\right)^5 + C_{12}^a\left(\frac{H_k}{D}\right)^4\left(\frac{h_j}{D}\right) + C_{13}^a\left(\frac{H_k}{D}\right)^3\left(\frac{h_j}{D}\right)^2 + C_{14}^a\left(\frac{H_k}{D}\right)^2\left(\frac{h_j}{D}\right)^3 + C_{15}^a\left(\frac{H_k}{D}\right)\left(\frac{h_j}{D}\right)^4,\end{aligned} \tag{Г.1}$$

$$\begin{aligned}\left(\hat{b}_{jk}\right)_{-/0/+} &= C_1^b\left(\frac{H_k}{D}\right) + C_2^b\left(\frac{h_j}{D}\right)^2 + C_3^b\left(\frac{H_k}{D}\right)\left(\frac{h_j}{D}\right) + C_4^b\left(\frac{H_k}{D}\right)^3 + C_5^b\left(\frac{H_k}{D}\right)^2\left(\frac{h_j}{D}\right) + \\ &+ C_6^b\left(\frac{H_k}{D}\right)\left(\frac{h_j}{D}\right)^2 + C_7^b\left(\frac{H_k}{D}\right)^4 + C_8^b\left(\frac{H_k}{D}\right)^3\left(\frac{h_j}{D}\right) + C_9^b\left(\frac{H_k}{D}\right)^2\left(\frac{h_j}{D}\right)^2 + C_{10}^b\left(\frac{H_k}{D}\right)\left(\frac{h_j}{D}\right)^3 + \\ &+ C_{11}^b\left(\frac{H_k}{D}\right)^5 + C_{12}^b\left(\frac{H_k}{D}\right)^4\left(\frac{h_j}{D}\right) + C_{13}^b\left(\frac{H_k}{D}\right)^3\left(\frac{h_j}{D}\right)^2 + C_{14}^b\left(\frac{H_k}{D}\right)^2\left(\frac{h_j}{D}\right)^3 + C_{15}^b\left(\frac{H_k}{D}\right)\left(\frac{h_j}{D}\right)^4.\end{aligned} \tag{Г.2}$$

Примечание — Матрицы калибровочных коэффициентов $\hat{a}$ и $\hat{b}$ являются нижнетреугольными (число столбцов равно числу строк, все значения равны нулю при $j < k$), поскольку индекс *j* принимает значения от 1 до *N* (*N* — количество ступеней сверления), а индекс *k* — от 1 до *j*.

Г.3 По трем матрицам калибровочных коэффициентов $\hat{a}$ и $\hat{b}$ (с обозначениями индексов «−», «0», «+» каждая) вычисляют значения трех матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}_{jk}$ и $\bar{b}_{jk}$ (с обозначениями индексов «−», «0», «+» каждая) по формулам (Г.3) и (Г.4) (значение $\hat{a}_{j0}$ приравнено к нулю):

$$\bar{a}_{jk} = \hat{a}_{jk} - \hat{a}_{jk-1}, \tag{Г.3}$$

$$\bar{b}_{jk} = \hat{b}_{jk} - \hat{b}_{jk-1}. \tag{Г.4}$$

Г.4 Матрицы калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$ для каждой *j*-й ступени сверления определяют по формулам (А.1) — (А.4), используя при этом три матрицы калибровочных коэффициентов $\bar{a}$ и $\bar{b}$ (с обозначениями индексов «−», «0», «+» каждая).

Г.5 Матрицу регуляризации $\overline{c}$ составляют в форме, представленной в формуле (Г.5). Количество столбцов и строк в матрице $\overline{c}$ равно количеству ступеней сверления отверстия.

$$\overline{c} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & & & \\ -1 & 2 & -1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -1 & 2 & -1 \\ & & & 0 & 0 \end{bmatrix}. \qquad (Г.5)$$

**Приложение Д**
**(обязательное)**

## Определение матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$, $\bar{c}$ для неоднородных по глубине остаточных напряжений в тонкостенных исследуемых объектах

Д.1 Для каждой *j*-й ступени сверления определяют константы $C_1^a...C_{15}^a$, $C_1^b...C_{15}^b$. Для этого используют три группы констант:

- указанные в таблицах К.1 и К.2 (для тензорозетки типа А) или в таблицах К.3 и К.4 (для тензорозетки типа В) — для нормированной толщины *W/D*, равной 0,25;
- указанные в таблицах К.5 и К.6 (для тензорозетки типа С) — для нормированной толщины *W/D*, равной 0,6.

Д.2 Для каждой *j*-й ступени сверления отверстия и *k*-й ступени остаточных напряжений по выбранным значениям для трех групп констант, соответствующих нормированным диаметрам:

- $D_0/D$, равными 0,3, 0,4 и 0,5 (для тензорозеток типов А и В);
- $D_0/D$, равными 0,36, 0,48 и 0,60 (для тензорозетки типа С),

определяют соответствующие значения матриц калибровочных коэффициентов $\hat{a}$ и $\hat{b}$ по формулам (Г.1) и (Г.2). При этом в формулах значения $\frac{H_k}{D}$ и $\frac{h_j}{D}$ умножают на величину, равную 0,25/*W* (для тензорозеток типов А и В) или равную 0,6/*W* (для тензорозетки типа С).

Д.3 Матрицы калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$, $\bar{c}$ для каждой *j*-й ступени сверления определяют в соответствии с Г.3 — Г.5.

**Приложение Е**
**(обязательное)**

## Определение матриц калибровочных коэффициентов $\overline{a}$, $\overline{b}$, $\overline{c}$ для неоднородных по глубине остаточных напряжений в исследуемых объектах переходной толщины

Е.1 В соответствии с указанными в таблицах К.1—К.6 значениями выбирают три табличных значения нормированных толщин $(W/D)_-$, $(W/D)_0$, $(W/D)_+$. Табличное значение нормированной толщины $(W/D)_0$ выбирают как наиболее близкое к нормированной толщине $W/D$ исследуемого объекта. Табличные значения нормированных толщин $(W/D)_-$ и $(W/D)_+$ выбирают на шаг меньше и больше относительно значения $(W/D)_0$.

***Пример — Если нормированная толщина исследуемого объекта W/D равна 0,32, а измерения деформаций проводят с использованием тензорозетки типа А, тогда используют табличное значение нормированной толщины $(W/D)_0$, равное 0,30. Соответственно табличные значения нормированных толщин $(W/D)_-$ и $(W/D)_+$ равны 0,25 и 0,40.***

Е.2 Для каждой $j$-й ступени сверления определяют константы $C_1^a...C_{15}^a$, $C_1^b...C_{15}^b$, указанные в таблицах К.1 и К.2 (для тензорозетки типа А), или К.3 и К.4 (для тензорозетки типа В), или К.5 и К.6 (для тензорозетки типа С). Для этого используют выбранные значения нормированных толщин $(W/D)_-$, $(W/D)_0$, $(W/D)_+$ и нормированных диаметров:

- $D_0/D$, равными 0,3, 0,4 и 0,5 (для тензорозеток типов А и В);
- $D_0/D$, равными 0,36, 0,48 и 0,60 (для тензорозетки типа С).

Е.3 Для каждой $j$-й ступени сверления определяют значения матриц калибровочных коэффициентов $\hat{a}$ и $\hat{b}$ по формулам (Г.1) и (Г.2).

Примечание — Матрицы калибровочных коэффициентов $\hat{a}$ и $\hat{b}$ определяют для каждой ступени сверления, для каждого из трех выбранных значений $(W/D)_-$, $(W/D)_0$, $(W/D)_+$ и для каждого из трех табличных значений нормированных диаметров $D_0/D$. Итоговое количество каждой из матриц калибровочных коэффициентов $\hat{a}$ и $\hat{b}$ на одной ступени сверления равно 9.

Е.4 Для каждой $j$-й ступени сверления, табличного значения нормированной толщины и табличного значения нормированного диаметра вычисляют значения матриц калибровочных коэффициентов $\overline{a}_{jk}$ и $\overline{b}_{jk}$ (с обозначениями индексов «−», «0», «+» минимального, среднего и максимального нормированных диаметров $D_0/D$ для используемой тензорозетки) по формулам (Г.3) и (Г.4). Значение $\hat{a}_{j0}$ приравнивают к нулю.

Е.5 Матрицы калибровочных коэффициентов $\overline{a}$, $\overline{b}$ для каждой $j$-й ступени сверления, табличного значения нормированной толщины и табличного значения нормированного диаметра вычисляют по формулам (В.2) и (В.3).

Е.6 Матрицу регуляризации $\overline{c}$ определяют в соответствии с Г.5.

## Приложение Ж
## (обязательное)

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

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

Ж.2 Упругие свойства материала двух моделей (модуля упругости *E* и коэффициента Пуассона μ) принимают равными упругим свойствам материала исследуемого объекта, на котором проводят определение остаточных напряжений.

Ж.3 Создают сетку конечных элементов. Размер элементов на боковой поверхности отверстия ограничен максимальным размером — не более 0,001 мм.

Ж.4 Проводят расчет напряженно-деформированного состояния моделей для двух вариантов двухосных нагрузок, приложенных к боковым сторонам (см. рисунок Ж.1) — при двухосном растяжении, при двухосном растяжении — сжатии.

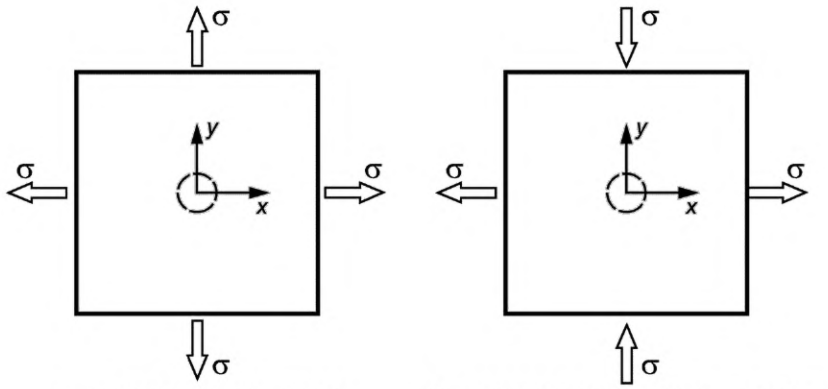



Рисунок Ж.1 — Схема приложения нагрузок к боковым поверхностям моделей, соответствующих напряжению σ. Вид в плоскости *xy* сверления отверстия; пунктиром отмечено отверстие

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

1) при двухосном растяжении модели без отверстия: $u'_1$, $v'_1$, $w'_1$;
2) при двухосном растяжении модели с отверстием: $u''_1$, $v''_1$, $w''_1$;
3) при двухосном растяжении — сжатии модели без отверстия: $u'_2$, $v'_2$, $w'_2$;
4) при двухосном растяжении — сжатии модели с отверстием: $u''_2$, $v''_2$, $w''_2$.

Ж.6 Для двух вариантов двухосных нагрузок вычисляют разницу перемещений *u*, *v*, *w*, полученных на моделях без отверстия и с отверстием по формулам:

$$u_1 = u''_1 - u'_1, \quad (Ж.1)$$

$$v_1 = v''_1 - v'_1, \quad (Ж.2)$$

$$w_1 = w''_1 - w'_1, \quad (Ж.3)$$

$$u_2 = u''_2 - u'_2, \quad (Ж.4)$$

$$v_2 = v''_2 - v'_2, \quad (Ж.5)$$

$$w_2 = w''_2 - w'_2. \quad (Ж.6)$$

Ж.7 Значения поправочных коэффициентов $A$, $B$, $C$, $F$, $G$ при заданных упругих свойствах материала исследуемого объекта, диаметре отверстия и при шаге сверления вычисляют по формулам:

$$A = \frac{u_1 \cdot \cos\theta + v_1 \cdot \sin\theta}{2\sigma}, \quad (Ж.7)$$

$$B = \frac{u_2 \cdot \cos\theta + v_2 \cdot \sin\theta}{2\sigma \cdot \cos(2\theta)}, \quad (Ж.8)$$

$$C = \frac{v_2 \cdot \cos\theta - u_2 \cdot \sin\theta}{2\sigma \cdot \sin(2\theta)}, \quad (Ж.9)$$

$$G = \frac{w_2}{2\sigma \cdot \cos(2\theta)}, \quad (Ж.10)$$

$$F = \frac{w_1}{2\sigma}. \quad (Ж.11)$$

Ж.8 Для модели глубиной и шириной 30 мм, высотой 10 мм, с характеристиками упругости $E$ = 200 ГПа, $\mu$ = 0,3, радиусом несквозного отверстия 2 мм и глубиной 0,05 мм пример графиков зависимости полученных поправочных коэффициентов от расстояния до центра отверстия представлен на рисунке Ж.2.

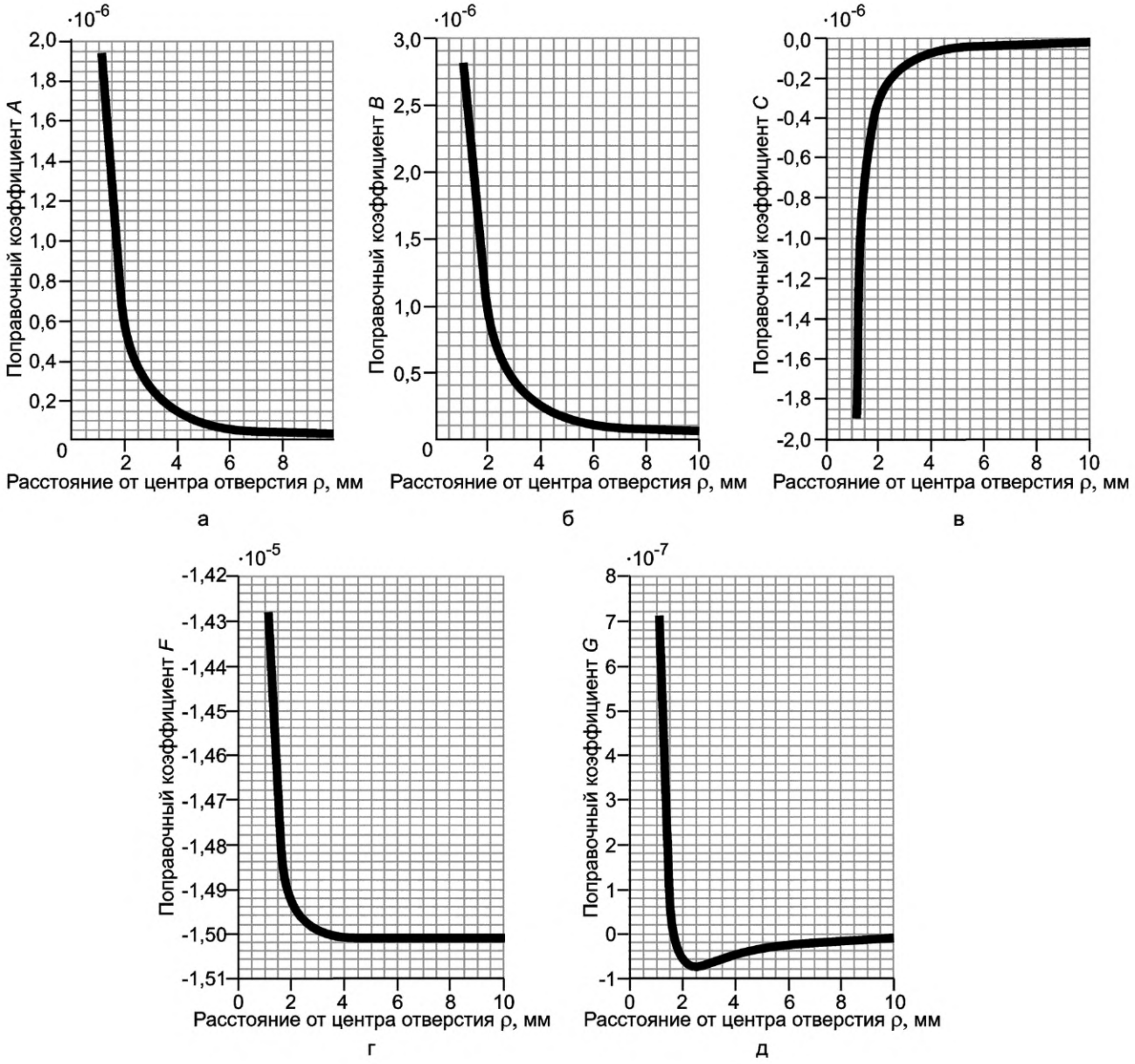



Рисунок Ж.2 — Графики зависимости поправочных коэффициентов от расстояния до центра отверстия

## Приложение И
(обязательное)

## Значения констант для определения однородных остаточных напряжений в объектах переходной толщины и массивных исследуемых объектах

В приложении указаны величины констант $C_1^a...C_5^a$, $C_1^b...C_5^b$, которые используются при определении матриц калибровочных коэффициентов $\overline{a}$, $\overline{b}$ в соответствии с приложениями Б или В. В зависимости от типа тензорозетки используют величины из таблицы И.1 (тип А), И.2 (тип Б) или И.3 (тип С).

Таблица И.1 — Значения констант при различных нормированных диаметрах $D_0/D$ и нормированных толщинах $W/D$ (для тензорозетки типа А)

| $D_0/D$ | $W/D$ | $C_1^a$ | $C_2^a$ | $C_3^a$ | $C_4^a$ | $C_5^a$ | $C_1^b$ | $C_2^b$ | $C_3^b$ | $C_4^b$ | $C_5^b$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 И.2 — Значения констант при различных нормированных диаметрах $D_0/D$ и нормированных толщинах $W/D$ (для тензорозетки типа B)

| $D_0/D$ | $W/D$ | $C_1^a$ | $C_2^a$ | $C_3^a$ | $C_4^a$ | $C_5^a$ | $C_1^b$ | $C_2^b$ | $C_3^b$ | $C_4^b$ | $C_5^b$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 И.3 — Значения констант при различных нормированных диаметрах $D_0/D$ и нормированных толщинах $W/D$ (для тензорозетки типа C)

| $D_0/D$ | $W/D$ | $C_1^a$ | $C_2^a$ | $C_3^a$ | $C_4^a$ | $C_5^a$ | $C_1^b$ | $C_2^b$ | $C_3^b$ | $C_4^b$ | $C_5^b$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 К
## (обязательное)

## Значения констант для определения неоднородных остаточных напряжений в объектах переходной толщины и массивных исследуемых объектах

В приложении указаны величины констант $C_1^a...C_{15}^a$, $C_1^b...C_{15}^b$, которые используются при определении матриц калибровочных коэффициентов $\bar{a}$, $\bar{b}$ в соответствии с приложениями Г или Д. В зависимости от типа тензорозетки используют величины из таблиц К.1 и К.2 (тип А), таблиц К.3 и К4 (тип Б), таблиц К.5 и К.6 (тип С).

Таблица К.1 — Значения констант $C_1^a...C_{15}^a$ при различных нормированных диаметрах $D_0/D$ и нормированных толщинах $W/D$ (для тензорозетки типа А)

| $D_0/D$ | $W/D$ | $C_1^a$ | $C_2^a$ | $C_3^a$ | $C_4^a$ | $C_5^a$ | $C_6^a$ | $C_7^a$ | $C_8^a$ | $C_9^a$ | $C_{10}^a$ | $C_{11}^a$ | $C_{12}^a$ | $C_{13}^a$ | $C_{14}^a$ | $C_{15}^a$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 К.2 — Значения констант $C_1^b...C_{15}^b$ при различных нормированных диаметрах $D_0/D$ и нормированных толщинах $W/D$ (для тензорозетки типа А)

| $D_0/D$ | $W/D$ | $C_1^b$ | $C_2^b$ | $C_3^b$ | $C_4^b$ | $C_5^b$ | $C_6^b$ | $C_7^b$ | $C_8^b$ | $C_9^b$ | $C_{10}^b$ | $C_{11}^b$ | $C_{12}^b$ | $C_{13}^b$ | $C_{14}^b$ | $C_{15}^b$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 К.3 — Значения констант $C_1^a...C_{15}^a$ при различных нормированных диаметрах $D_0/D$ и нормированных толщинах $W/D$ (для тензорозетки типа В)

| $D_0/D$ | $W/D$ | $C_1^a$ | $C_2^a$ | $C_3^a$ | $C_4^a$ | $C_5^a$ | $C_6^a$ | $C_7^a$ | $C_8^a$ | $C_9^a$ | $C_{10}^a$ | $C_{11}^a$ | $C_{12}^a$ | $C_{13}^a$ | $C_{14}^a$ | $C_{15}^a$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 К.4 — Значения констант $C_1^b...C_{15}^b$ при различных нормированных диаметрах $D_0/D$ и нормированных толщинах $W/D$ (для тензорозетки типа В)

| $D_0/D$ | $W/D$ | $C_1^b$ | $C_2^b$ | $C_3^b$ | $C_4^b$ | $C_5^b$ | $C_6^b$ | $C_7^b$ | $C_8^b$ | $C_9^b$ | $C_{10}^b$ | $C_{11}^b$ | $C_{12}^b$ | $C_{13}^b$ | $C_{14}^b$ | $C_{15}^b$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 К.5 — Значения констант $C_1^a...C_{15}^a$ при различных нормированных диаметрах $D_0/D$ и нормированных толщинах $W/D$ (для тензорозетки типа С)

| $D_0/D$ | $W/D$ | $C_1^a$ | $C_2^a$ | $C_3^a$ | $C_4^a$ | $C_5^a$ | $C_6^a$ | $C_7^a$ | $C_8^a$ | $C_9^a$ | $C_{10}^a$ | $C_{11}^a$ | $C_{12}^a$ | $C_{13}^a$ | $C_{14}^a$ | $C_{15}^a$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 К.6 — Значения констант $C_1^b...C_{15}^b$ при различных нормированных диаметрах $D_0/D$ и нормированных толщинах $W/D$ (для тензорозетки типа С)

| $D_0/D$ | $W/D$ | $C_1^b$ | $C_2^b$ | $C_3^b$ | $C_4^b$ | $C_5^b$ | $C_6^b$ | $C_7^b$ | $C_8^b$ | $C_9^b$ | $C_{10}^b$ | $C_{11}^b$ | $C_{12}^b$ | $C_{13}^b$ | $C_{14}^b$ | $C_{15}^b$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 |

УДК 620.1:621.9.011:006.354 ОКС 19.060 ОКПД 2:71.20.12

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

Редактор *Л.С. Зимилова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *И.Ю. Литовкиной*

Сдано в набор 01.04.2024. Подписано в печать 09.04.2024. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 4,18. Уч-изд. л. 3,30.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru