

А.П. Исаев, канд. техн. наук, доц.,

Ю.Ф. Гуляев, доц. кафедры инженерной геодезии,

В.С. Стрилец, канд. техн. наук,

П.О. Чуланов, ст. преподаватель

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

ОЦЕНКА МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ И ОСАДКИ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ

На примере вертикального стержня из низкоуглеродистой стали, который жестко закреплен и деформируется в результате осадки нижнего основания, сделан расчет точности измерения деформации растяжения при условии, что она позволит отследить предел упругости. Показана возможность измерения деформации с помощью тензометрических датчиков. Рассмотрены вопросы мониторинга такой конструкции.

Ключевые слова: деформация, осадка, напряжения, предел упругости, вертикальный металлический стержень, точность измерений, датчики деформации, геодезический мониторинг.

Вступление. Элементы строительных конструкций (ЭСК) претерпевают разного рода деформации в результате силовых и температурных воздействий. Силовые воздействия происходят от внешних нагрузок [7]. В качестве внешних нагрузок могут быть смещения элементов, вызванные, например, природными факторами, такими как осадка земной поверхности под сооружением. Пока деформации находятся в пределах расчетных значений, они не страшны для конструкций сооружения, однако, если они превысят допустимые значения, то может возникнуть опасность их эксплуатации. Поэтому за многими крупными, сложными, ответственными сооружениями ведется постоянный мониторинг методами инженерной геодезии и с применением датчиков деформаций, перемещений, наклонов и т.п. Создаются автоматизированные системы мониторинга с большим количеством различных датчиков, установленных по всему объёму сооружения и под фундаментами, закрепленных на поверхности несущих конструкций или залитых в бетон.

Результаты измерения смещений и деформаций, их точность должны отражать все этапы прохождения элементом измененного и деформированного состояния.

Анализ исследований и публикаций. Анализ основных исследований и публикаций по данной тематике представлен в работе [1].

Постановка задания. В статье поставлена задача вычислить значения СКП измерения деформации растяжения ЭСК по параметрам, зависящим от материала и от напряжений, возникающих в нём, под нагрузкой. Для расчета взять физическую модель элемента в виде прямолинейного вертикального однородного стержня, подверженного деформации в результате осадки массива

© А.П. Исаев, Ю.Ф. Гуляев, В.С. Стрилец, П.О. Чуланов, 2019

под нижним основанием. Показать возможность измерения деформации растяжения с полученной из расчета точностью.

Основная часть. В работе [1] приведена формула для расчета СКП (при вероятности $P = 0,9973$) измерения смещения конца стержня в результате деформации в виде продольного растяжения. Деформация вызвана воздействием на него продольной растягивающей силы, возникшей в результате осадки нижнего основания стержня. При этом верхнее основание осталось неподвижным.

Запишем формулу из [1] в виде относительной погрешности и сделаем некоторые расчеты.

$$\frac{m_z}{l} = \frac{1}{3\sqrt{2}E} \delta\sigma \quad (1)$$

Как видим, точность измерения деформации зависит от модуля упругости и от выбранной ширины интервала напряжений, ограничивающего область предельных упругих деформаций.

Модуль упругости, пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочих этапов деформации зависят от материала, из которого изготовлен исследуемый элемент.

В строительстве и в промышленности несущие элементы крупных инженерных объектов изготавливают в основном из стали и железобетона.

Для изготовления металлических элементов конструкций применяются различные марки стали, которые подходят именно для данной области. Это такие разновидности стали как конструкционная и строительная. Для создания системы обозначений и маркировки стали её классифицируют по химическому составу, качеству, прочности и т.д.

Одним из наиболее важных химических элементов в составе конструкционной и строительной стали является углерод. Особенностью строительной стали, которая имеет наибольшее применение в строительных конструкциях, является то, что она содержит низкий процент углерода. Это, так называемая, низкоуглеродистая сталь. Углерод придает стали прочность и твердость, снижая пластичность и вязкость. Чем больше углерода в ней, тем выше её прочность, но ниже пластичность, и наоборот. По химическому составу сталь классифицируется на углеродистую и легированную. Углеродистая сталь подразделяется на низкоуглеродистую ($< 0,3\%$ C), среднеуглеродистую и высокоуглеродистую.

Основной и самый главный показатель качества стали, это содержание в ней примесей – серы, фосфора и т.д. Чем их меньше, тем лучше. В зависимости от этого, по качеству сталь подразделяется на обыкновенного качества, качественную, высококачественную и особо качественную. Сталь обыкновенного качества содержит до 0,05% вредных примесей и имеет маркировку «Ст» в начале обозначения. Для изготовления широкого ассортимента строительных конструкций используется, например, сталь марки Ст3сп (ДСТУ 2651:2005). Эта сталь относится к классу низкоуглеродистых металлов нормальной прочности и обыкновенного качества [2]. Модуль упругости такой стали $E = 2 \cdot 10^5$ Мпа.

Пределу пропорциональности для данной марки стали соответствует значение напряжения $\sigma_{пр} = 200$ Мпа, а пределу упругости значение напряжения

$\sigma_{\text{упр}} = 210$ Мпа [3]. Тогда предельное отклонение напряжения δ_{σ} , соответствующее ширине интервала упругого нелинейного удлинения, т.е. удлинения от предела пропорциональности до предела, за которым начинаются остаточные деформации, составит 10 Мпа.

Подставив соответствующие значения в формулу (1), получим:

$$\frac{m_z}{l} = \frac{1}{85000}, \text{ т.е. } 0,012 \text{ мм на } 1 \text{ м длины.} \quad (2)$$

С вероятностью $P = 0,95$ будем иметь:

$$\frac{m_z}{l} = \frac{1}{57000}, \text{ т.е. } 0,018 \text{ мм на } 1 \text{ м длины.} \quad (3)$$

Посмотрим, как изменяется результат при изменении интервала напряжений. Расширим интервал напряжений до предела текучести и тем уменьшим точность измерений. Пределу текучести для данной марки стали соответствует значение напряжения $\sigma_{\text{тек}} = 240$ Мпа. Однако при этом рискуем попасть в область остаточных деформаций, вплоть до начала текучести материала. Предельное отклонение напряжения составит 40 Мпа, тогда

$$\frac{m_z}{l} = \frac{1}{21000}, \text{ т.е. } 0,048 \text{ мм/м.} \quad (4)$$

Измерить деформацию с точностью, которая задана формулами (2) или (3) возможно с помощью датчиков деформации.

В общем случае датчик – это компонент измерительного, сигнального, регистрирующего, управляющего устройства, преобразующий изменение контролируемой физической величины в сигнал, удобный для измерения, передачи, обработки, регистрации и т.д. [4].

Поэтому в измерительных устройствах в зависимости от вида измеряемой величины различают датчики деформаций (напряжений), перемещений (линейных, угловых), температуры, давления и т.д. В зависимости от физического принципа работы и от формируемого на выходе сигнала, датчики подразделяются на электрические, оптические, индуктивные, механические и другие.

Электрический датчик деформации (ДД) реагирует на деформацию растяжения¹⁾ (или сжатия) на том участке элемента строительной конструкции, на котором он закреплен, и предназначен для измерения относительной деформации. Датчик деформации является первичным элементом измерительного устройства и измеряет один вид деформации на определенном участке. Для измерения сложных видов деформаций создаются измерительные цепи, состоящие из определенного количества датчиков.

В современных автоматизированных системах геодезического мониторинга крупных зданий и инженерных сооружений используют во многих случаях простые и надежные тензометрические датчики деформации (ТДД), основанные на тензорезистивном или пьезорезистивном эффекте. Для технически сложных объектов с опасным производством, там, где могут возникнуть чрезвычайные ситуации и где доступ человека ограничен, применяют, например, более сложные и высокоточные волоконно-оптические датчики деформации (ВОДД) [5].

¹⁾ Все другие виды деформации считаются более сложными и могут быть представлены в виде комбинации деформаций растяжения/сжатия и сдвига.

Тензометрический датчик деформации жестко крепится на исследуемом металлическом или железобетонном элементе конструкции и деформируется вместе с ним. Материал, из которого сделан чувствительный элемент датчика, токопроводящий (металлическая проволока, пленка или полупроводник) и при деформации изменяет своё удельное электрическое сопротивление. Как следствие, изменяется сопротивление чувствительного элемента датчика, которое измеряется соответствующими приборами.

В современных системах мониторинга ТДД имеют цифровой выход на электронный блок, который преобразует аналоговый тензометрический сигнал в цифровой сигнал, передаваемый по проводной линии. Цифровой выход позволяет организовать последовательные измерительные цепи, состоящие из большого количества датчиков и передавать информацию на компьютер на расстояние до нескольких сот метров.

Каждый класс ТДД имеет определенный диапазон измерения деформации и соответствующую точность измерения. Их величина зависит от принципа работы и технических характеристик устройства. Эти два параметра тесно связаны между собой. Как правило, чем выше точность измерения, тем меньше диапазон измерения ²⁾.

Не рассматривая какой-то один конкретный датчик или класс датчиков, приведем реальные характеристики некоторого условного тензодатчика (можно посмотреть цифровой тензодатчик деформации TMG с такими же характеристиками [6]). Погрешность измерения многих подобных тензодатчиков составляет обычно 1% от диапазона измерения. Диапазон измерения цифровых ТДД при измерении деформаций растяжения может быть в пределах 0 – 300 мкм/м; 0 – 600 мкм/м; 1600 мкм/м и доходить до 2200 мкм/м и более. Возьмем, к примеру датчик с точностной характеристикой 1% от 1000 мкм/м, что равно 10 мкм/м или 0,010 мм/м. Как видим, с помощью такого датчика можно измерить величину продольной деформации рассматриваемого нами элемента в пределах одного миллиметра на один метр длины с точностью, которая соответствует расчету (2) и позволяет контролировать развитие деформации до предела упругости.

В общей системе геодезического мониторинга инженерных сооружений наблюдениям за осадками и деформациями конструкций и их элементов уделяется особое внимание. Осадка, как вертикальное смещение сооружения в целом, может не сопровождаться деформациями (равномерная осадка) или происходить совместно с деформациями (неравномерная осадка). Деформация, как смещение частиц элемента конструкции относительно друг друга может происходить только в результате силового воздействия ³⁾, например, осадки. Поэтому мониторинг за вертикальными смещениями элементов строительной конструкции должен предусматривать совместное измерение осадки и деформации. Необходима методика наблюдений: «осадка + деформация», потому что, если есть смещения, то важно понимать, это осадка или это деформация, или это их совместное проявление. Покажем это на примере мониторинга рассматриваемого нами вертикального металлического стержня, жестко закрепленного в верхнем и нижнем основании. Во всех случаях происходит

осадка массива, на котором закреплено нижнее основание стержня. Воздействие на стержень проявляется в виде силы \vec{F} (рис. 1, в [1]).

²⁾ Существует большое количество датчиков, классифицируемых по разным признакам, однако, не выбирая какой-то конкретный тип датчика, здесь мы приводим обобщенные значения с целью показать возможность измерения малых деформаций с обозначенной в начале статьи точностью.

На стержне с помощью точечной сварки закреплен тензометрический датчик. В верхнем основании стержня закреплена осадочная марка, отметка которой определяется нивелиром. Обратим внимание на то, что, если закрепить марку в другом месте, она окажется в зоне деформации.

Возможны следующие варианты происходящих процессов.

1. Пусть измерения на осадочную марку показывают, что осадка происходит, а датчик деформации показывает, что деформации нет. Это означает, что верхнее основание стержня свободно, без сопротивления опускается под действием силы \vec{F} вслед за нижним основанием. В таком случае стержень смещается в целом, но не деформируется.

Отметка осадочной марки может быть определена цифровым нивелиром с одной станции коротким лучом с точностью $0,030 \div 0,050$ мм.

2. Пусть измерения на осадочную марку показывают, что осадки, т.е. смещения стержня в целом нет, а датчик деформации показывает, что происходит растяжение стержня. Это означает, что верхнее основание стержня неподвижно, а опускается массив с нижним основанием, растягивая стержень. В таком случае стержень в целом не смещается, а деформируется.

Точность измерения деформации показана выше.

3. Пусть измерения показывают, что происходит одновременный процесс осадки и деформации. Это означает, что верхнее основание стержня сопротивляется действию силы \vec{F} , но всё же смещается на какую-то величину, а стержень растягивается на какую-то величину под действием силы.

Точность измерения смещения и деформации должна быть синхронизирована и сопоставима.

Выводы. Расчет показывает, что точность измерения деформации растяжения низкоуглеродистой стали очень высокая и может ещё больше увеличиться для металлов повышенной прочности и с другой (менее выраженной) диаграммой растяжения. Но современные устройства позволяют измерять деформации с такой точностью. Такие устройства в виде сетей датчиков деформации включаются в общую систему геодезического мониторинга.

Конструкции инженерных сооружений претерпевают как постоянные, так и изменяющиеся силовые и температурные воздействия. Силовые воздействия происходят в виде так называемых распределённых и сосредоточенных сил, характеризующихся векторами разной направленности, модуля и точки приложения. Температурные воздействия происходят в зонах и ареалах нагрева/охлаждения. Силовые и температурные воздействия вызывают изменения размеров и форм элементов конструкции. Если воздействия неравномерные, то и деформации сложные. В результате деформаций они могут растягиваться или сжиматься,

сдвигаться, изгибаться, закручиваться, изменяя свое пространственное положение. Поэтому в системе геодезического мониторинга важен выбор места закрепления датчиков, расположение и ориентация их на/в элементе, расстояния между ними, чтобы видеть картину деформации элемента в целом и оценивать происходящие смещения.

³⁾ О других воздействиях смотри [7].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Исаев А.П.* Принципы измерения осадки статически неопределимых конструкций (на примере прямолинейного вертикального стержня) / А.П. Исаев, Р.В. Шульц, Ю.Ф. Гуляев, В.С. Стрилец // *Інженерна геодезія: наук.-техн. зб.* – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 64. – С. 55-66.

2. *Інженерный справочник: стали по ГОСТ, классификация, свойства.* Режим доступа:

<https://dpva.ru/Guide/GuideMatherials/Metalls/SteelsAndSteelAlloys/SteelsToGostClassification/SteelsToGostClassificationPrint/>.

3. *Студопедия: диаграмма растяжения стали марки Ст3.* Режим доступа: https://studopedia.su/19_95574_diagramma-rastyazheniya-stali-marki-st.html.

4. *Электронная электротехническая библиотека.* Режим доступа: http://www.electrolibrary.info/subscribe/sub_16_datchiki.htm.

5. *Датчики деформации (экстензометры).* Режим доступа: http://www.devicesearch.ru.com/article/datchiki_deformacii.

6. *TMG. Цифровой тензодатчик деформации.* Режим доступа: <http://www.ntpgorizont.ru/product/tmg-d01>.

7. *Исаев А.П.* Особенности геодезического мониторинга разных строительных конструкций / А.П. Исаев, Ю.Ф. Гуляев, П.А. Чуланов // *Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. зб.* – К.: КНУБА, 2019. – Вип. 70. – С. 230-240.

REFERENCES

1. Isayev A.P., Shul'ts R.V., Gulyayev YU.F., Strilets V.S. (2017). Printsipy izmereniya osadki staticheski neopredelimykh konstruksiy (na primere pryamolineynogo vertikal'nogo sterzhnya) [Principles of measuring the settlement of statically indeterminate structures (by the example of a straight vertical bar)]. *Inzhenerna heodeziia - Engineering geodesy*, 64, 55-66 [in Ukrainian].

2. *Inzhenernyy spravochnik: stali po GOST, klassifikatsiya, svoystva.* Retrived from:

<https://dpva.ru/Guide/GuideMatherials/Metalls/SteelsAndSteelAlloys/SteelsToGostClassification/SteelsToGostClassificationPrint/>.

3. *Studopediya: diagramma rastyazheniya stali marki St3.* Retrived from: https://studopedia.su/19_95574_diagramma-rastyazheniya-stali-marki-st.html.

4. *Elektronnaya elektrotekhnicheskaya biblioteka.* Retrived from: http://www.electrolibrary.info/subscribe/sub_16_datchiki.html.

5. *Datchiki deformatsii (ekstenzometry).* Retrived from: http://www.devicesearch.ru.com/article/datchiki_deformacii

6. TMG. Tsifrovoy tenzodatchik deformatsii. Retrived from: <http://www.ntpgorizont.ru/product/tmg-d01/>

7. Isayev A.P., Gulyayev YU.F., Chulanov P.A. (2019). Osobennosti geodezicheskogo monitoringa raznykh stroitel'nykh konstruksiy [Features of geodetic monitoring of various building structures]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban and territorial planning*, 70, 230-240 [in Russian].

О.П. Исаев, Ю.Ф. Гуляев, В. С. Стрелец, П.О. Чуланов
ОЦІНКА МОНІТОРИНГУ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМАЦІЇ ТА
ОСІДАННЯ ПРЯМОЛІНІЙНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ

На прикладі вертикального стержня з низьковуглецевої сталі, який жорстко закріплений і деформується в результаті осідання нижньої основи, зроблений розрахунок точності вимірювання деформації розтягування за умови, що вона дозволить відстежити межі пружності. Показана можливість вимірювання деформації за допомогою тензометричних датчиків. Розглянуто питання моніторингу такої конструкції.

Ключові слова: деформація, осідання, напруження, межа пружності, вертикальний металевий стержень, точність вимірювань, датчики деформації, геодезичний моніторинг.

O. Isayev, Yu. Gulayev, V. Strilets, P. Chulanov
EVALUATION OF MONITORING THE PROCESS OF DEFORMATION AND
SEDIMENTATION OF A RIGHT LINE VERTICAL ROD

Elements of building structures (EBS) undergo various kinds of deformation as a result of force and temperature effects. As long as the deformations are within the design values, they are not terrible for the structures of the structure, however, if they exceed the permissible values, then there may be a danger of their operation. Therefore, many large, complex, critical structures are constantly monitored by engineering geodesy methods and using sensors of deformations, displacements, tilts, etc.

On the example of a vertical rod made of low-carbon steel, which is rigidly fixed and deformed as a result of subsidence of the lower base, the calculation of the accuracy of measuring the tensile strain is calculated, provided that it allows you to track the elastic limits.

The calculation shows that the accuracy of measuring the tensile deformation of low-carbon steel is very high and can increase even more for metals of increased strength and with a different (less pronounced) tensile diagram. But modern devices can measure deformations with such precision. Such devices in the form of strain gauge networks are included in the general geodetic monitoring system.

Keywords: deformation, sediment, stress, elastic limit, vertical metal rod, measurement accuracy, strain gauges, geodetic monitoring.