УДК 69.058.2

© М. О. Лобовский, магистрант

© А. Л. Туккия, старший преподаватель

© П. А. Пяткин, доцент

(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: lobovskiy.m@mail.ru, atlector@mail.ru,
ptkn@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-3-71-75

© М. О. Lobovskiy, undergraduate

© A. L. Tukkiya, senior teacher

© P. A. Pyatkin, Associate Professor

(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: lobovskiy.m@mail.ru, atlector@mail.ru,
ptkn@mail.ru

СРАВНЕНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ ДЕФОРМАЦИЙ И УСИЛИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МИКРОМЕТРА И ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

COMPARISON ANALYSIS OF USING MICROMETERS AND STRAIN GAUGES FOR MEASURING DEFORMATIONS AND LOADS IN THE METHOD OF MONITORING THE STRESS-STRAIN STATE

Способ измерения деформаций и усилий в стержневых элементах с применением микрометра доказал свою эффективность не только в рамках лабораторных испытаний, но и в процессе полевых испытаний на реальной строительной площадке. Сравнительный анализ предлагаемого авторами способа контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) с широко используемым в наше время тензорезистивным методом показал, что способ измерения деформаций и усилий с применением микрометра не уступает в точности тензорезистивному, хотя является значительно дешевле.

Ключевые слова: измерения, микрометр, тензорезистивный метод, лабораторное испытание, полевые испытания, усилия, напряжения.

The micrometer method for measuring deformations and loads in bar elements has proved to be effective not only in laboratory tests, but also in field tests on a real construction site. Having carried out a comparative analysis of the method proposed by the authors for monitoring the stress-strain state (SSS) with the strain gauge method which is widely used at present, the authors have proved that the method for measuring deformations and loads using a micrometer is not inferior in accuracy to the strain gauge method, although it is much cheaper.

Keywords: measurements, micrometer, strain gauge method, laboratory testing, field tests, loads, stresses.

Способ измерения деформаций и усилий в стержневых элементах с применением микрометра показал свою эффективность не только в рамках лабораторного испытания № 1 [1], проведенного авторами, при котором была достигнута высокая сходимость значений продольного усилия (погрешность при этом составила не более 7 %), но и в процессе полевого испытания, где с его помощью были определены фактические напряжения и усилия [4], возникающие в распорном элементе [2, 3]. Реальные значения усилий в распорке оказались значительно меньше тех, которые закладывались при расчете данной конструкции.

В апреле 2021 года в механической лаборатории имени Н. Н. Аистова (СПбГАСУ) было проведено лабораторное испытание № 2. Целью данного эксперимента было сравнение результатов измерений, полученных при использовании способа, предлагаемого авторами статьи, с тензорезистивным методом [6] контроля напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций [5].

В отличие от лабораторного испытания № 1 [1], где в качестве исследуемого элемента применялась металлическая пластина размерами $l \times b \times t$: 600 × 50 × 4 мм (рис. 1), выполненная из стали С245 [7], для проведения эксперимента

№ 2 использовалась электросварная труба диаметром 108 мм с толщиной стенки 3,5 мм [8] и длиной 800 мм, выполненная из стали той же марки. Для закрепления образца в захваты разрывной машины INSTRON (максимальной мощностью до 500 кН [9]) в исследуемый элемент (рис. 1) вваривались [10] две металлические пластины толщиной 8 мм, длина одного сварного шва при этом составляла 125 мм, а катет шва равнялся 4 мм.

Для проведения лабораторного эксперимента на исследуемый образец были установлены четыре пары измерительных марок вдоль направ-

ления предполагаемого главного напряжения [11, 13]. Расположение марок позволило проводить контроль деформаций и усилий, возникающих в элементе, в четырех точках, находящихся во взаимно перпендикулярных плоскостях. Тензоболты устанавливались на расстоянии 96 ± 4 мм, что максимально приближено к верхнему пределу измерений прибора (микрометра). Измерительные марки (рис. 2) для данного исследования выполнялись в виде болта, в верхней части которого с шести сторон выполнены лунки под наконечники микрометра. Данная конструкция марки значительно отличается от

Рис. 1. Образцы для испытаний: а — образец для лабораторного испытания № 1; б — образец для лабораторного испытания № 2

Рис. 2. Измерительная марка (тензоболт)

той, которая использовалась при проведении лабораторного испытания № 1. Одной из основных проблем, которая привела к изменению конструкции марки, было то, что в первоначальном исполнении на марке делалась лишь одна лунка под установку прибора, поэтому у нее было лишь одно положение, при котором возможно провести измерения, это и вызывало трудности при ее установке. Благодаря новой конструкции марки данная проблема была решена. Также свою эффективность данное решение измерительной марки доказало при полевом испытании (рис. 2) на реальной строительной площадке.

Для сравнения результатов измерений двух методов контроля НДС [5] конструкций в рамках проведения лабораторного испытания № 2 между измерительными марками в четырех точках на поверхности образца устанавливались фольговые тензодатчики (рис. 3) [12] с расчетной длиной 10 мм и коэффициентом тарировки, равным $1,798 \text{ кг/см}^2$. Отчет по тензодатчикам фиксировался на тензостанции на каждой ступени нагружения два раза, до и после измерений перемещений марок с помощью микрометра. Результаты лабораторного испытания № 2 представлены в таблице и на рис. 4 и 5.

По результатам проведенного лабораторного испытания можно сделать следующие выводы:

- разница между значениями **напряжений**, полученных с тензодатчиков и при измерении микрометром, находится в диапазоне **0,3–8 %**;
- разница между значениями **продольных усилий** [13], полученных с тензодатчиков и при измерении микрометром, находится в диапазоне **1–9 %**.

Получив высокую сходимость результатов двух методов анализа НДС, можно сделать окончательный вывод о возможности использования метода измерений деформаций и усилий с применением микрометра на реальных строительных конструкциях. Данный метод является на сегодняшний день наименее затратным по сравнению с другими методами и одним из самых простых способов контроля НДС в продолжительном периоде наблюдений.

Библиографический список

1. Лобовский М. О., Тукция А. Л., Пяткин П. А., Хегай Е. О. Измерение деформаций и усилий в стержневых элементах с применением микрометра // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 58–63.
2. Верстов В. В., Гайдо А. Н., Иванов Я. В. Технологии устройства ограждений котлованов в условиях городской застройки и акваторий / под ред. В. В. Верстова. СПб. [и др.]: Лань, 2014. 365 с.
3. Ренгач В. Н. Шпунтовые стенки. Расчет и проектирование. Л.: Стройиздат, 1970. 112 с.

Рис. 3. Место расположение тензодатчиков и измерительных марок (тензоболтов)

Результаты лабораторного испытания № 2

№ п/п	Нагрузка, кН	Марки				Напряжения		Продольная сила	
		1	2	3	4	при измерении микрометром	при измерении тензодатчиками	при измерении микрометром	при измерении тензодатчиками
		L_1 , мкм	L_2 , мкм	L_3 , мкм	L_4 , мкм	σ_m , МПа	σ_r , МПа	N_m , кН	N_r , кН
1	10	93,446	99,918	98,775	98,365	–	–	–	–
2	30	93,452	99,933	98,78	98,369	24,27	26,55	27,88	30,50
3	50	93,47	99,947	98,79	98,364	44,00	45,20	50,56	51,93
4	70	93,484	99,96	98,803	98,367	66,77	63,58	76,72	73,06
5	90	93,488	99,972	98,817	98,362	79,84	82,68	91,73	95,00
6	100	93,493	99,977	98,826	98,367	92,97	92,05	106,83	105,77
7	50	93,473	99,954	98,798	98,352	47,65	47,75	54,75	54,87
8	100	93,497	99,983	98,814	98,367	92,02	92,56	105,73	106,35
9	110	93,498	99,984	98,82	98,37	98,03	101,59	112,64	116,74
10	130	93,507	99,993	98,828	98,377	115,46	121,37	132,67	139,46
11	150	93,513	99,997	98,839	98,385	130,76	141,59	150,24	162,69
12	130	93,508	99,992	98,84	98,372	119,14	125,96	136,89	144,73
13	110	93,502	99,987	98,836	98,371	111,39	107,64	127,99	123,68
14	100	93,496	99,982	98,827	98,369	99,76	98,09	114,63	112,71
15	90	93,494	99,975	98,825	98,367	92,96	89,34	106,82	102,65
16	70	93,49	99,954	98,816	98,354	68,44	70,53	78,63	81,04
17	50	93,483	99,936	98,809	98,355	52,17	51,97	59,95	59,71
18	30	93,476	99,926	98,794	98,352	33,77	32,89	38,8	37,80

Рис. 4. Зависимость напряжений от нагрузки

4. Атапин В. Г. Сопротивление материалов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2019. 342 с.

5. Деменчук Н. П., Прилуцкий А. А. Основы теории напряженного и деформированного состояния. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 118 с.

6. Сазыкин И. А. Обследование и испытание сооружений. М.: РГОТУПС, 2003. 94 с.

7. Кушнер В. С., Вережачка А. С., Схиртладзе А. Г., Негров Д. А., Бургонова О. Ю. Материаловедение / под ред. В. С. Кушнера. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. 232 с.

8. Манжосов В. К., Новикова О. Д. Геометрические характеристики плоского сечения. Ульяновск: УлГТУ, 2018. 36 с.

Рис. 5. Изменение продольного усилия

9. Астафурова Е. Г. Механические испытания материалов. Томск: ИФПМ СО РАН, 2013. 32 с.

10. Лупачёв В. Г. Ручная дуговая сварка. 4-е изд., стер. Минск: Вышэйшая школа, 2014. 416 с.

11. Бурлака В. В., Кучеренко С. И., Мазоренко Д. И., Тищенко Л. Н. Прикладная механика. Ч. 2. Основы расчетов на прочность. Харьков, 2011. 300 с.

12. Мехеда В. А. Тензометрический метод измерения деформаций. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 54 с.

13. Межецкий Г. Д., Загребин Г. Г., Решетник Н. Н. Сопротивление материалов / под общ. ред. Г. Д. Межецкого, Г. Г. Загребина. 5-е изд. М.: Дашков и К, 2016. 432 с.

References

1. Lobovskiy M. O., Tukkiya A. L., Pyatkin P. A., Khogay E. O. *Izmerenie deformatsiy i usilij v sterzhnevnykh elementakh s primeneniem mikrometra* [Measuring of deformations and forces in rod elements using a micrometer]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 4 (81), pp. 58–63

2. Verstov V. V., Gaydo A. N., Ivanov Ya. V. *Tekhnologii ustroystva ograzhdeniy kotlovanov v usloviyakh gorodskoy zastroyki i akvatoriy* [Technologies for the construction of pit fences in urban development and water areas]. Ed. by Verstov V. V. Lan' Publ; 2014, 365 p.

3. Rengach V. N. *Shpuntovye stenki. Raschet i projektirovanie* [Pile walls. Calculation and design]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1970, 112 p.

4. Atapin V. G. *Soprotivlenie materialov: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* [Resistance of materials: textbook and practice for

academic undergraduate studies]. 2-nd ed., revised. Moscow, Yurayt Publ., 2019, 342 p.

5. Demenchuk N. P., Prilutskiy A. A. *Osnovy teorii napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya* [Fundamentals of the theory of stressed and strained state]. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2016, 118 p.

6. Sazykin I. A. *Obsledovanie i ispytanie sooruzheniy* [Survey and testing of structures]. Moscow, RGOTUPS Publ., 2003, 94 p.

7. Kushner V. S., et al. *Materialovedenie* [Materials Science]. Ed. by Kushner V. S. Omsk, OmGTU Publ., 2008, 232 p.

8. Manzhosov V. K., Novikova O. D. *Geometricheskie kharakteristiki ploskogo secheniya* [Geometric characteristics of the flat section]. Ul'yanovsk, UIGTU Publ., 2018, 36 p.

9. Astafurova E. G. *Mekhanicheskie ispytaniya materialov* [Mechanical tests of materials]. Tomsk, IFPM SO RAN Publ., 2013, 32 p.

10. Lupachyov V. G. *Ruchnaya dugovaya svarka* [Manual arc welding]. 4-th ed., revised. Minsk, Higher School Publ., 2014, 416 p.

11. Burlaka V. V., Kucherenko S. I., Mazorenko D. I., Tishchenko L. N. *Prikladnaya mekhanika* [Applied Mechanics]. Pt. 2. *Osnovy raschetov na prochnost'* [Fundamentals of strength calculations]. Khar'kov, 2011, 300 p.

12. Mekheda V. A. *Tenzometricheskii metod izmereniya deformatsiy* [The strain gauge method for measuring deformations]. Samara, Samar. gos. aerokosm. un-t Publ., 2011, 54 p.

13. Mezhet'skiy G. D., Zagrebina G. G., Reshetnik N. N. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. Ed. by Mezhet'skiy G. D., Zagrebina G. G., the 5-th ed. Moscow, Dashkov i K Publ., 2016, 432 p.