

УДК 624.014  
ББК 38.54  
Д-44

*Вернези Никас Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭСАО Ростовского государственного строительного университета;*

*Веремеенко Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭСАО Ростовского государственного строительного университета;*

*Веремеенко Елена Геннадьевна, аспирант кафедры ОПД Ростовского государственного строительного университета;*

*Хутыз Абрек Махмудович, кандидат технических наук, профессор кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин Майкопского государственного технологического университета, e-mail: [alfa-maikop@yandex.ru](mailto:alfa-maikop@yandex.ru).*

## ДИАГНОСТИКА ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ (рецензирована)

*Представлены материалы с проблематикой диагностирования металлических конструкций зданий, результатами диагностики металлоконструкций методом неразрушающего контроля прочностных характеристик вновь построенных зданий складского типа и производственного назначения в г. Ростове-на-Дону.*

*Сделан анализ информации по оценкам механических характеристик, полученным непосредственно на месте производства строительных работ с применением системы неразрушающего метода «Прочность».*

*Ключевые слова: диагностика, металлоконструкции, несущая способность, механические характеристики, прочность, неразрушающий контроль, надежность строительных конструкций.*

*Vernezi Nikas Leonidovich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of TESAE, Rostov State University of Civil Engineering;*

*Veremeenko Andrey Anatolievich, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the Department of TESAE, Rostov State University of Civil Engineering;*

*Veremeenko Elena Gennadievna, postgraduate student of GPD, Rostov State University of Civil Engineering;*

*Khoutyz Abrek Makhmudovich, Candidate of Technical Sciences, professor of the Department of Construction and General Professional Disciplines, Maikop State Technological University.*

## DIAGNOSTICS OF STRENGTH OF METAL STRUCTURES (Reviewed)

*The materials on the problems of diagnosing metal constructions and the results of diagnostics of metal structures by NDC of strength characteristics of the newly built warehouse type buildings and industrial facilities in the city of Rostov-on-Don.*

*The analysis of the information on the evaluation of mechanical properties obtained on the site of construction work with the application of non-destructive method of "Strength."*

*Keywords: diagnosis, metal structures, carrying capacity, mechanical properties, durability, non-destructive control, reliability of engineering structures.*

Диагностика технического состояния металлической конструкции сегодня сводится к проведению трех основных мероприятий: как можно более полному дефектоскопическому контролю, качественному определению напряженно-деформированного состояния конструкции, выявлению прочностных возможностей материала.

Давно известные и хорошо разработанные дефектоскопические методы радиационного, ультразвукового, магнитного, капиллярного контроля широко применяются при обследовании строительных конструкций. В той или иной степени, но с достаточной достоверностью эти методы дают возможность выявлять внутренние дефекты элементов конструкции [1].

Для качественной оценки напряженно-деформированного состояния конструкции применяются различные методы компьютерного моделирования. Здесь главной проблемой представляется достижение максимальной достоверности модели, описывающей реальное состояние конструкции в эксплуатации, что в первую очередь связано с большими затратами времени.

Однако для оценки несущей способности конструкции с помощью такого моделирования необходимо задаться исходными данными, в том числе и механическими характеристиками материала конструкции именно на момент проведения диагностических работ. Как отмечают многие авторы [2, 3], металл в процессе эксплуатации изменяет свои прочностные возможности,

причем в различных местах по-разному. То есть в местах наиболее напряженных снижение прочностных характеристик могут быть более значимыми. Авторы [4] при оценке остаточного ресурса промышленных труб исходят из того, что в эксплуатации происходит непрерывное накопление повреждений с самого начала приложения нагрузки и вплоть до возможного разрушения, при этом вероятность повышения нагруженности возрастает.

В то же время нормативный документ [5] в этих случаях запрещает отбор проб для оценки прочности методами разрушающего контроля. При этом требования государственного стандарта [6] регламентируют подтверждение проектных значений прочностных характеристик на уровне не ниже 0,95. В этой сложной ситуации единственным выходом представляется применение при диагностических работах оперативных и достоверных методов неразрушающего контроля прочностных характеристик. Одним из косвенных методов неразрушающего контроля (без механического взаимодействия инструмента и исследуемого металла), представляется, например, магнитный. Так, его применение для диагностики конструкции [7] основано на предложенной связи коэрцитивной силы с ее циклической долговечностью. Однако неоднозначность такой связи отмечается в [3] вследствие того, что априори неизвестно где могут накапливаться повреждения, приводящие к разрушению. Кроме того, нет, по мнению автора, оснований считать, что накопившиеся пластические деформации обязательно приведут к разрушению из-за перехода материала в хрупкое состояние. Автор отмечает необходимость сочетания неразрушающих с разрушающими методами контроля, указывая на высокую эффективность применения при диагностировании методов фрактографического анализа. При этом акцентировано внимание на том, что количественная фрактография полезна при диагностике металла даже когда в конструкции еще нет трещин и по анализу изломов металла, возможно предположить направление развития трещины.

В предыдущих отчетах [8] и [9] были представлены работы, связанные с проблематикой диагностики прочности металлических конструкций. Было отмечено возможное влияние на сопротивляемость конструкции предварительного напряжения (например, от собственного веса металлоконструкции), а также влиянием упругой деформации стального элемента металлоконструкции на получаемые при неразрушающем контроле механические характеристики. По результатам этих работ были сделаны выводы о том, что в упругой области влияние напряженно-деформированного состояния конструкции, вызванного растяжением и обусловленного собственным весом конструкции, на результаты, получаемые системой «ПРОЧНОСТЬ», находится в пределах ошибки измерений, а тенденции влияния расположения точек измерения на получаемые системой «ПРОЧНОСТЬ» механические характеристики не выявлено.

С помощью системы «Прочность» ранее были получены результаты исследования влияния упрочнения металла одноосным растяжением [10,11], температурного фактора [12] на оценку механических характеристик, а также влияния коэффициента упрочнения металла на получаемую в результате фрактографического анализа долю вязкой составляющей в изломе. Как следствие, был разработан алгоритм оценки максимального напряжения, которое способен выдержать металл из условия сохранения способности к вязкому разрушению [13].

Система неразрушающего контроля механических свойств «Прочность» постоянно совершенствуется, одним из интересных моментов, на решение которых будут направлены исследования в ближайшей перспективе, это возможность определения с помощью неразрушающего контроля температурного порога вязкохрупкого перехода.

В настоящее время работы по совершенствованию и повышению эффективности применения системы неразрушающего контроля механических характеристик «Прочность» сотрудниками кафедры ТЭСАО были продолжены при диагностировании прочности двух сооружений построенных на левом берегу Дона в г. Ростове-на-Дону. Основной целью этой диагностики явилось подтверждение заявленных в проектной документации прочностных характеристик металла. Результаты обследований строительных конструкций регулярно обобщаются и публикуются в печати [14, 15, 16].

Обследовалась металлоконструкция складского здания рамного типа 40x126 м, расположенного на левом берегу г. Ростове-на-Дону.

В соответствии с [17] и [18] при исследовании и испытании металла необходимо оценить предел текучести, предел прочности и относительное удлинение. При этом количество элементов, проверяемых в партии должно быть не менее двух, образцов от каждого элемента не менее двух от всей партии для оценки  $HV$ ,  $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ;  $\delta$ .

Поскольку определить документально принадлежность того или иного элемента к партии не представлялось возможным, а неразрушающий метод существенно увеличивает представительность выборки и достоверность результатов, была выбрана следующая схема испытаний.

Обследовались элементы металлоконструкций: колонны, фасонки, косынки и фрагменты

сварных соединений. На каждом из элементов шлифовальной машиной снимался слой краски и ржавчины до образования пятна чистого металла, на котором производилось 15-20 измерений методом ударного внедрения индентора прибора ЦИТ-1. Из 29 рядов несущих элементов (две колонны и ферма) металлоконструкции здания были обследованы элементы 3-х рядов: 12, 15 и 18-го.

Результаты измерений статистически обрабатывались и оценивались их средние значения (фрагменты из полученных результатов приведены в таблице 1).

Таблица 1

№ п/п	Элемент металлоконструкции, толщина металла	НВ	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
1	2	3	4	5	6
1	Ф15 с севера восточная сторона (ось А) (4,1х 120х120) основная наклонная	121	227	354	24
2		129	264	406	26
3		109	243	387	29
4		144	289	428	24
5		119	252	395	27
6		119	252	395	28
7		123	257	399	27
8		109	243	387	29
9		113	247	390	28
	Среднее	121	227	354	24
10	Ф15 восточная сторона верх т2 (120х120х4.2 мм)	122	256	398	27
11		139	279	419	25
12		119	253	395	27
13		142	284	424	24
14		116	250	392	28
15		143	285	425	24
16		125	259	401	27
	Среднее	129	267	408	26

По проектным данным несущие металлоконструкции выполнены из труб квадратного сечения 120х120х4 и 80х80х3. Заявленные в проекте требования к прочности металла выражены классом прочности **C245**.

Из анализа таблицы №1 следует, что металл трубы **120х120х4** имеет следующие средние значения механических характеристик:

- твердость: **140НВ;** - предел прочности **421МПа;**
- предел текучести: **282МПа;** - относительное удлинение: **24%.**

Для сталей класса **C245** значение предела текучести не должно быть ниже **245МПа**, что указывает на полное удовлетворение требованиям к прочности металла трубы **120х120х4**.

Металл трубы **80х80х3** имеет следующие средние значения механических характеристик:

- твердость: **126НВ;** - предел прочности **404МПа;**
- предел текучести: **263МПа;** - относительное удлинение: **26%.**

Эти значения ниже, чем прочностные характеристики металла трубы **120х120х4**, однако также удовлетворяют требованиям проекта.

Прокат листовой по проектной документации требуется применять в конструкциях также классом прочности **C245**.

**Высокопрочные болты** по результатам измерений имеют следующие средние значения механических характеристик:

- твердость: **283НВ;** - предел прочности **935МПа;**
- предел текучести: **842МПа;** - относительное удлинение: **7%.**

По проекту высокопрочные болты в соответствии должны быть иметь класс прочности 8.8, или предел текучести не ниже **640 МПа**, предел прочности не ниже **800 МПа**, что также указывает на достаточный запас прочности установленных болтов относительно требований НТД.

Такие значения соответствуют классу прочности стали не ниже **C245**, что удовлетворяет требованиям к прочности;

**Сварные соединения** по результатам измерений имеют следующие средние значения механических характеристик:

- твердость: **153НВ;** - предел прочности **446МПа;**
- предел текучести: **309МПа;** - относительное удлинение: **22%.**

Качество швов сварных соединений стабильное, существенного рассеивания прочностных характеристик не наблюдается, а их значения несколько превышают значения характеристик основного металла, что указывает на удовлетворение требований к прочности сварных соединений.

Для проведения ультразвукового обследования был применен ультразвуковой прибор ТТ-100 производства фирмы «Time group Inc», зарегистрированной в государственном реестре средств измерений под №19411-00 и допущенной к применению в РФ (сертификат №7661).

Толщины труб, полученные ультразвуковым измерением (графа 2, табл. 1) имеют следующие средние значения: среднее значение толщин труб 120x120 – **4,13 мм**, среднее значение толщин труб 80x80 – **3,33 мм**.

Все средние значения имеют превышения над заявленными в проекте.

В результате диагностических работ складского здания можно сделать следующее заключение.

- несущие элементы труб сечением 120x120x4, 80x80x4 металлоконструкции здания имеют прочностные характеристики, соответствующие или превышающие требуемые проектом;
- высокопрочные болты имеют прочностные характеристики, превышающие требуемые проектной документацией;
- анкерные болты колонн №12, №15, №18 М28 имеют площадь сечения на 6,6% ниже, чем требуемые проектной документацией М30, вместе с тем их прочностные характеристики на 28% превышают требуемые проектной документацией;
- листовые стальные детали имеют характеристики, удовлетворяющие или превышающие требуемые проектом;
- сварные соединения по геометрии и по прочностным характеристикам соответствуют требуемым в проекте.

Для оценки прочностных характеристик использовался прибор ЦИТ-1, которым производилось 15-20 измерений методом ударного внедрения индентора. На каждом из элементов шлифовальной машиной снимался слой краски и ржавчины до образования пятна чистого металла.

Данные обобщались и анализировались (фрагменты представлены в таблице 2).

Таблица 2

№ п/п	Элемент металлоконструкции, толщина металла	НВ	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
1	2	3	4	5	6
1	Колонна К2 справа от входа (полка 19,7 мм, 19,5 мм, стенка 15,1 мм) полка	117	250	393	28
2		119	253	395	27
3		119	253	395	27
4		125	259	401	27
5		129	264	405	26
6		129	264	405	26
7		130	266	407	26
8		134	272	412	25
9		134	271	412	25
10		137	276	416	25
11		140	281	421	24
12		143	286	425	24
13		148	296	434	23
	Среднее	131	269	409	26

Из анализа таблицы №1 следует, что металл трубы **120x120** имеет минимальные значения механических характеристик:

- твердость: **155НВ;** - предел прочности **449МПа;**
- предел текучести: **312МПа;** - относительное удлинение: **22%.**

Эти значения соответствуют классу прочности стали не ниже **С285**.

Металл трубы **100x100** имеет следующие средние значения механических характеристик:

- твердость: **122НВ;** - предел прочности **401МПа;**
- предел текучести: **259МПа;** - относительное удлинение: **27%.**

Эти значения соответствуют классу прочности стали не ниже **С245**.

Металл трубы **60x60** имеет следующие средние значения механических характеристик:

- твердость: **115НВ;** - предел прочности **397МПа;**
- предел текучести: **254МПа;** - относительное удлинение: **28%.**

Эти значения соответствуют классу прочности стали не ниже **С245**.

**Полки колонн** по результатам измерений имеют большое рассеивание механических характеристик, средние значения которых следующие:

- твердость: **150 НВ;** - предел прочности **442 МПа;**
- предел текучести: **305 МПа;** - относительное удлинение: **23%.**

**Стенки колонн** по результатам измерений также имеют большое рассеивание

механических характеристик, средние значения которых следующие:

- |                     |                 |                            |                 |
|---------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| - твердость:        | <b>158 НВ;</b>  | - предел прочности         | <b>462 МПа;</b> |
| - предел текучести: | <b>326 МПа;</b> | - относительное удлинение: | <b>21%.</b>     |

Значения характеристик стенок и полок могут соответствовать металлу.

**Высокопрочные болты** класса прочности **8.8** по результатам измерений имеют следующие средние значения механических характеристик:

- |                    |                  |                            |                  |
|--------------------|------------------|----------------------------|------------------|
| - твердость:       | <b>324 НВ;</b>   | - предел текучести:        | <b>1058 МПа;</b> |
| - предел прочности | <b>1148 МПа;</b> | - относительное удлинение: | <b>8%.</b>       |

По проекту высокопрочные болты в соответствии должны быть иметь класс прочности 8.8, или предел текучести не ниже **640 МПа**, предел прочности не ниже **800 МПа**, что также указывает на достаточный запас прочности установленных болтов относительно требований НТД.

**Сварные соединения** по результатам измерений имеют следующие средние значения механических характеристик:

- |                     |                 |                            |                 |
|---------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| - твердость:        | <b>229 НВ;</b>  | - предел прочности         | <b>671 МПа;</b> |
| - предел текучести: | <b>555 МПа;</b> | - относительное удлинение: | <b>16 %.</b>    |

Качество швов сварных соединений стабильное, существенного рассеивания прочностных характеристик не наблюдается, а их значения несколько превышают значения характеристик основного металла, что указывает на удовлетворение требований к прочности сварных соединений.

Толщины труб, полученные ультразвуковым измерением (графа 2, таблица 2) имеют следующие средние значения:

среднее значение толщин труб 120x120 - **4,25 мм,**

среднее значение толщин труб 100x100 - **3,55 мм.**

среднее значение толщин труб 120x120 - **4,0 мм.**

Такие толшины соответствуют требованиям [19]. Труба квадратная.

У колонн значения толщин полок имеют большое рассеивание и заключены между 13,9 мм и 19,7 мм. Значения толщин стенок заключены в интервале от 12,7 до 15,1 мм.

Проведенные диагностические работы металлоконструкций здания завода «Меринос» позволили сделать следующее заключение:

- толшины труб квадратного профиля 60x60, 100x100, 120x120 соответствуют требованиям ГОСТ 30245-003;

- металл труб квадратного профиля 60x60, 100x100, 120x120 имеет класс прочности не ниже **C245**;

- значения механических характеристик стенок и полок могут соответствовать металлу класса прочности не ниже **C285**;

- класс прочности высокопрочных болтов превышает указанные на их торцах значения 8.8;

- прочность металла сварных соединений превышает прочность основного металла;

- прочность анкерных болтов соответствует требованиям ГОСТ 24379.1.

Система «Прочность» применяется в диагностических целях для получения всех механических характеристик металла, в любом месте конструкции. Это один из инструментов, необходимых для отработки алгоритма определения остаточного ресурса металлоконструкции.

Получаемые оценки имеют высокие стабильность и достоверность.

#### **Литература:**

1. Технические средства диагностирования / Клюев В.В. [и др.]. М.: Машиностроение, 1989. 672 с.
2. Иванова В.С., Терентьева В.Ф. Природа усталости металлов. М.: Металлургия, 1975. 456 с.
3. Горицкий В.М. Диагностика металлов. М.: Металлургиздат, 2004. 408 с.
4. Губайдулин Р.Г., Губайдулин М.Р., Шматков А.С. Анализ методов оценки остаточного ресурса дымовых и вентиляционных промышленных труб. Челябинск: Южно-Урал. гос. ун-т, 2008.
5. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М., 2004.
6. ГОСТ Р 54257 – 2010. Надежность строительных конструкций и оснований.
7. Попов Б.Е., Мужижкий В.Ф., Безлюдько Г.Я. // Контроль. Диагностика. 2002. №3(45). С. 15-19.
8. Исследование влияния предварительного напряжения в металле на получаемые при неразрушающем контроле механические характеристики: отчет о НИР / Ростов. гос. строит. ун-т. Ростов н/Д., 2008.
9. Исследование влияния упругой деформации стального элемента металлоконструкции на получаемые при неразрушающем контроле механические характеристики: отчет о НИР / Ростов. гос. строит. ун-т. Ростов н/Д., 2009.
10. Беленький Д.М., Вернези Н.Л., Косенко Е.Е. О прочностных возможностях арматурных

сталей // Бетон и железобетон. 2004. №3.

11. Вернези Н.Л. Прочностной резерв арматурных сталей // Изв. Ростов. гос. строит. ун-та. 2003. №7. С. 27-33.

12. Вернези Н.Л. Критерий прочности и прочностные возможности арматурных сталей для их применения в зимних условиях при работах методом раздельного бетонирования // Там же. 2009. №8.

13. Способ определения физического критерия прочности материалов: пат. 2234692: МПК G01N / Беленький Д.М., Ханукаев М.Г., Вернези Н.Л. заявл. 23.07.03; опубл. 20.08.04.

14. Беленький Д.М., Бескопильный А.Н., Вернези Н.Л. Опыт диагностики металлических конструкций // Изв. вузов. Строительство. 2003. №1. С. 99-102.

15. Диагностика прочности металла ферм покрытия здания ЗСК «СПОРТ-ДОН» неразрушающим методом / Бескопильный А.Н. [и др.] // Изв. Ростов. гос. строит. ун-та. 2008. №13.

16. Мониторинг прочности элементов металлоконструкций социальных объектов Сочи / Бескопильный А.Н. [и др.] // Там же. 2010. №15.

17. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции. М., 1988.

18. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М., 2004.

19. ГОСТ 30245-003. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. М., 2004.

#### **References:**

1. *Technical means of diagnosis / Klyuev V.V. [and oth.]. M.: Mechanical Engineering, 1989. 672 p.*
2. *Ivanova V.S., Terentieva V.F. The nature of metal fatigue. M.: Metallurgy, 1975. 456 p.*
3. *Goritskii V.M. Diagnosis of metals. M.: Metallurgizdat, 2004. 408 p.*
4. *Gubaidulin R.G., Gubaidulin M.R., Shmatkov A.S. Analysis of methods of assessment of the residual resources of flue and ventilation industrial pipes. Chelyabinsk: South Ural State University, 2008.*
5. *SP 13-102-2003. Rules of inspection of bearing structures of buildings and structures. M., 2004.*
6. *GOST R 54257 - 2010. Reliability of structures and foundations.*
7. *Popov B.E., Muzhitski V.F., Bezlyudko G.Y. // Control. Diagnostics. 2002. № 3 (45). P.15-19.*
8. *Investigation of the influence of pre-stress in the metal on mechanical properties obtained in nondestructive testing: research report / Rostov State University of Civil Engineering. Rostov-on-Don. 2008.*
9. *Investigation of the influence of the elastic deformation of steel element of metal structure on mechanical properties obtained in the non-destructive testing: research report/ Rostov State University of Civil Engineering. Rostov-on-Don. 2009.*
10. *Belenky M.D., Vernezi N.L., Kosenko E.E. On the durable possibilities of reinforcement steels // Concrete and reinforced concrete. 2004. № 3.*
11. *Vernezi N.L. Strength reserve of reinforcement steels // Proceedings of Rostov State University of Civil Engineering. 2003. № 7. P.27-33.*
12. *Vernezi N.L. Strength criterion and strength capabilities of reinforcement steel for use in winter conditions when working by the method of separate concreting // Proceedings of Rostov State University of Civil Engineering. 2009. № 8.*
13. *The method for determining the physical criterion of strength of materials: pat. 2234692 : IPC G01N / Belenky D.M., Khanukaev M.G., Vernezi N.L. appl. 23.07.03; publ. 20. 08. 2004.*
14. *Belenky D.M., Beskopylny A.N., Vernezi N.L. Experience of diagnostics of metal structures // Proceedings of universities. Construction. 2003. № 1. P.99-102.*
15. *Diagnostics of strength of metal farms of covering the building SK "SPORT-DON" by non-destructive method / Beskopylny A.N. [and oth.] // Proceedings of Rostov State University of Civil Engineering. 2008. № 13.*
16. *Strength monitoring of elements of metal structures of social facilities in Sochi/ Beskopylny A.N. [and oth.] // Proceedings of Rostov State University of Civil Engineering. 2010. № 15.*
17. *SNP II-23-81. Steel structures. M., 1988*
18. *SP 13-102-2003. Rules of inspecting of bearing structures of buildings and structures. M., 2004.*
19. *Standard 30245-003. Steel profiles bent, closed, welded square and rectangular for buildings.M., 2004.*