

# Снижение силового сопротивления стальных колонн производственных зданий, получивших коррозионные повреждения при эксплуатации

УДК 624.075.23:531.223:001.891

**Бузало Н.А.**

Канд. техн. наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск); e-mail: buzalo\_n@mail.ru

**Гонтаренко И.В.**

Генеральный директор ООО «Ростов-инжиниринг» (г. Новочеркасск); e-mail: gontarenkoivan@mail.ru

**Черныховский Б.А.**

Аспирант, ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова» (г. Новочеркасск); e-mail: cbotms@gmail.com

Статья получена: 19.11.2020. Рассмотрена: 21.11.2020. Одобрена: 04.12.2020. Опубликовано онлайн: 30.12.2020. ©РИОР

**Аннотация.** При проведении обследований металлических конструкций производственных зданий выявляется одно из наиболее характерных повреждений — коррозия. Для оценки степени эксплуатационной пригодности и возможности дальнейшей безопасной эксплуатации строительной конструкции или здания и сооружения необходимо правильно оценить опасность коррозионного поражения и определить возможность дальнейшей эксплуатации. С этой целью выполнено экспериментальное исследование стоек с имитацией коррозионного поражения и сравнение с результатами расчета по нормативным рекомендациям.

**Ключевые слова:** обеспечение эксплуатационной безопасности зданий и сооружений,

коррозионный износ стальных конструкций производственных зданий, экспериментальные исследования стальных внецентренно сжатых стоек.

Основной задачей эксплуатационных служб зданий и сооружений на производственных предприятиях является обеспечение безопасности людей и оборудования, связанное в первую очередь с надежностью несущих конструкций [1; 2]. При обследовании производственных зданий, как правило, выявляются повреждения, влияющие на особенности силового сопротивления несущих конструкций. Для оценки степени эксплуатационной пригодности и возможности дальнейшей безопасной эксплуатации

## REDUCING THE FORCE RESISTANCE OF STEEL COLUMNS IN INDUSTRIAL BUILDINGS WITH CORROSION DAMAGE DURING OPERATION

**Buzalo N.A.**

Candidate of Technical Sciences, Professor, Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk;  
e-mail: buzalo\_n@mail.ru

**Gontarenko I.V.**

General Director, LLC «Rostov-engineering», Novocherkassk;  
e-mail: gontarenkoivan@mail.ru

**Chernikhovski B.A.**

Postgraduate Student, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk; e-mail: cbotms@gmail.com

**Manuscript received:** 19.11.2020. **Revised:** 21.11.2020. **Accepted:** 04.12.2020. **Published online:** 30.12.2020. ©RIOR

**Abstract.** When conducting inspections of metal structures of industrial buildings, one of the most characteristic damages is

revealed — corrosion. To assess the degree of serviceability and the possibility of further safe operation of a building structure or a building and structure, it is necessary to correctly assess the danger of corrosion damage and determine the possibility of further operation.

To assess the strength resistance of damaged structures, it is necessary to correctly assess the danger of corrosion damage and determine the possibility of further operation. For this purpose, an experimental study of columns with simulated corrosion damage was carried out and compared with the calculation results according to regulatory recommendations.

**Keywords:** ensuring the operational safety of buildings and structures, corrosive wear of steel structures of industrial buildings, experimental studies of steel eccentrically compressed racks planning solutions for school buildings; physical and moral deterioration of buildings characteristic damage to supporting structures.

строительной конструкции или здания и сооружения в целом [3] требуется установить некоторый диапазон значений физико-механических свойств строительных конструкций [4; 5], а также параметров дефектов и повреждений, выявленных в процессе обследования [6; 7]. Эксплуатация металлических конструкций производственных объектов в условиях агрессивных сред, сброса промышленных стоков и выбросов отработанных газов может привести к неконтролируемым деформациям несущих конструкций и аварийному состоянию зданий [8]. Наиболее характерными повреждениями стальных конструкций производственных зданий, влияющими на работоспособность и эксплуатационную пригодность, являются разрушение защитных покрытий и коррозия металла (рис. 1). Инженерные обследования зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях агрессивных сред, показывают, что межремонтные сроки соблюдаются не всегда, качество капитальных ремонтов, включая усиление строительных конструкций, не всегда удовлетворительное, традиционные методы антикоррозионной защиты не всегда эффективны [9].



**Рис. 1.** Коррозионное повреждение сквозной колонны производственного здания

Коррозионный износ элементов несущих стальных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, зависит от параметров среды (концентрация и состав агрессивных газов, жидкостей, пыли) и конструктивных особенностей элементов (марка стали, форма попереч-

ного сечения, место расположения в каркасе), что наглядно показано в работах [10; 11].

В работе [12] отмечается, что большинство аварий, причиной которых была коррозия несущих металлоконструкций, происходило внезапно без каких-либо заметных деформаций элементов, в то время как сечение под действием коррозии уменьшалось длительное время. Авторы объясняют это явление особенностями сечений, в которых коррозия неравномерна и имеются ослабления. На некоторых участках металл корродирует интенсивнее (рис. 2), не вызывая при этом заметных деформаций элементов, что может привести к внезапному разрушению, аналогичному хрупкому. При эксплуатации в агрессивных средах прежде всего повреждаются сечения с наличием щелей (например, сечения из спаренных уголков и швеллеров), труднодоступных для очистки и окраски при изготовлении и обслуживании, трубчатые и коробчатые сечения, недоступные для осмотра, элементы с прерывистыми швами и болтовыми соединениями.



**Рис. 2.** Слоистая коррозия стенки двутавровой колонны в месте фланцевого соединения демонтированного ригеля

Для оценки снижения несущей способности элементов с коррозионными повреждениями авторами данной статьи были выполнены численные [13–15] и экспериментальные исследования работы внецентренно сжатых стоек с

имитацией коррозионного повреждения [16; 17] с целью:

- определить опытным путем силовое сопротивление внецентренно сжатых стоек из стальных прокатных двутавров с имитацией коррозионного повреждения;
- исследовать напряженно-деформированное состояние стоек в процессе их нагружения и сравнить полученные значения напряжений и перемещений со значениями, полученными расчетом по рекомендациям нормативных документов.

Геометрические характеристики экспериментальных образцов с имитацией коррозионного повреждения приведены в табл. 1.

Таблица 1

### Геометрические характеристики экспериментальных образцов

Марка стойки	Длина, L, мм	Высота сечения, H, мм	Площадь сечения, см <sup>2</sup>		Ослабление сечения, %
			A	A <sup>деф</sup>	
C4	1532	100	12	8,15	32,1

На рис. 3 показаны экспериментальные модели стоек с наклеенными тензометрическими датчиками.

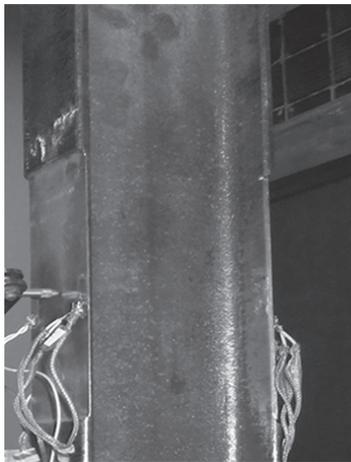


Рис. 3. Установка тензометрических датчиков на двутавровой стойке с имитацией коррозионного повреждения

Потеря несущей способности испытанных стоек происходила путем потери устойчивости второго рода, что соответствует первой группе предельных состояний. Среднее достигнутое значение максимального показания динамометра  $N_{кр} = 77,5$  кН принято в качестве предель-

ного значения нагрузки на стойку. Явлений местной потери устойчивости элементами стоек во время опытов не наблюдалось.

В нормативной литературе [18] значение критической нагрузки для стоек с ослаблениями сечений определяется по формуле:

$$\left( \frac{N + N^{\text{осл}}}{AR_{yo}\gamma_c} \right)^n + \frac{(M_x + M_x^{\text{осл}})y_c}{C_x I_x R_{yo}\gamma_c} + \frac{(M_y + M_y^{\text{осл}})x_c}{C_y I_y R_{yo}\gamma_c} \leq 1, \quad (1)$$

где  $N^{\text{осл}} = \sigma^{\text{осл}} A^{\text{осл}}$  — компенсирующая добавка к сжимающему усилию;

$M_x^{\text{осл}} = N^{\text{осл}} y^{\text{осл}}$  — компенсирующая добавка к изгибающему моменту при внецентренном сжатии;

$M_y^{\text{осл}} = N^{\text{осл}} x^{\text{осл}}$  — компенсирующая добавка к изгибающему моменту при внецентренном сжатии;

$x_c, y_c$  — координаты наиболее напряжённой точки фактического поперечного сечения в системе координат неповреждённого сечения;

$R_{yo}$  — предел текучести материала стойки;

$\gamma_c$  — коэффициент, учитывающий условия работы рассчитываемого элемента конструкции [19], принят равным 1,00;

$A, I_x, I_y$  — геометрические характеристики неповреждённого сечения;

$x^{\text{осл}}, y^{\text{осл}}$  — координаты центра тяжести площади ослабления  $A^{\text{осл}}$  в системе координат неповреждённого сечения;

$I_x^{\text{осл}}, I_y^{\text{осл}}$  — моменты инерции площади ослабления.

Для рассматриваемой стойки были рассчитаны необходимые параметры (табл. 2 и 3).

Таблица 2

### Геометрические характеристики сечения неповреждённой стойки, в мм

A <sub>факт</sub>	W <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	i <sub>x</sub>	i <sub>y</sub>	x <sub>o</sub>	y <sub>o</sub>	x <sub>c</sub>	y <sub>c</sub>
1195,4	39	5694,3	1 953	156	40,4	11,4	0,0	0,0	27,5	50
	061,1		055,5	594,2						

Таблица 3

### Геометрические характеристики ослабленного сечения стойки, в мм

A <sub>факт</sub>	W <sub>x</sub>	W <sub>y</sub>	I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	i <sub>x</sub>	i <sub>y</sub>	x <sub>o</sub>	y <sub>o</sub>	x <sub>c</sub>	y <sub>c</sub>
757,9	20	1794,0	944	47	35,3	7,9	0,0	0,0	26,5	46,0
	525,1		152,5	542,0						

Подставив приведенные выше значения в формулу (1), мы получили значение критической нагрузки  $F_{кр} = 47,75$  кН для поврежденной стойки методом подбора с использованием функции «подбор параметра» в *Excel*.

Сравнение величины критической силы, полученной экспериментальным путем, с рассчитанным по нормативной методике значением, позволяет сделать вывод о том, что расчетное значение критической нагрузки меньше

значения, полученного экспериментальным путем на 38%. Выполненное исследование показывает, что значения критической нагрузки, определенное по нормативной методике [18], дает коэффициент запаса 1,3–1,4.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90056/20.

*Acknowledgements: the reported study was funded by RFBR, project number 20-38-90056/20.*

## Литература

- ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения [Текст].
- Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций зданий и сооружений по внешним признакам [Текст] / ЦНИИПромзданий. — М.: Госстрой, 2001.
- Бузало Н.А. Определение коэффициента значимости строительных конструкций при оценке технического состояния зданий [Текст] / Н.А. Бузало, А.В. Канунников // Строительство и реконструкция. Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева (Орел). — 2018. — № 3. — С. 3–11.
- Рекомендации по обследованию стальных конструкций производственных зданий [Текст] / ЦНИИПроектстальконструкция. — М.: Госстрой СССР, 1988.
- РД 22-01-97. Требования к проведению оценки безопасности эксплуатации производственных зданий и сооружений поднадзорных промышленных производств и объектов (обследование строительных конструкций специализированными организациями) [Текст]. — М.: ЦНИИ «Проектстальконструкция», 1997.
- СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. Свод правил по проектированию и строительству [Текст]. — М.: Госстрой России; ГУЛ ЦПП, 2003.
- ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Общие положения [Текст]. — М.: Стандартинформ, 2010.
- Астафьев В.И. Накопление поврежденности в металлах в условиях коррозионного растрескивания под напряжением [Текст] / В.И. Астафьев, Л.К. Ширяева. — М.: Известия АН РАН. МТТ, 1997. — С. 60–68.
- Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов [Текст] / Г.В. Карпенко. — Киев: Наукова думка, 1976. — 125 с.
- Вольберг Ю.Л. Влияние агрессивных сред на несущую способность строительных металлических конструкций [Текст] / Ю.Л. Вольберг, А.С. Коряков // В кн. «Долговечность строительных конструкций на Севере». — Якутск, 1981.
- Аугустин Я. Аварии стальных конструкций [Текст] / Я. Аугустин, Е. Шледзевский. — М.: СИ, 1978. — 175 с.
- Овчинников И.Г. О методологии построения моделей конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами. Определение долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивной средой [Текст] / И.Г. Овчинников, В.В. Петров // Строительная механика и расчет сооружений. — 1982. — № 2. — С. 13–18.
- Шутова М.Н. Определение надежности и категории технического состояния поврежденных металлических конструкций на основе численного эксперимента [Текст] / М.Н. Шутова, С.И. Евтушенко, И.В. Гонтаренко // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2018. — № 4. — С. 98–104. — DOI: 10.17213/0321-2653-2018-4-98-104.
- Евтушенко С.И. Использование МКЭ при расчете элементов машин [Текст] / С.И. Евтушенко, С.А. Алексеев, И.А. Петров, В.Е. Федорчук // 14-я международная конференция «Динамика технических систем». ДТС 2018. Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 12–14 сентября 2018 г. Код 141842 // (2018) MATEC Web of Conferences 226, 04010. Scopus: 2-s2.0-85056493813. — DOI: 10.1051/mateconf/201822604010.
- Евтушенко С.И. Оптимизация металлической плиты с использованием МКЭ [Текст] / С.И. Евтушенко, И.А. Петров, С.А. Алексеев, А.С. Алексеева // 3-я международная конференция по промышленному проектированию, применению и производству, ICIEAM-2017 — Челябинск, Российская Федерация; 16–19 мая 2017. Код 131476 // Материалы конференции 19 октября 2017 г. Institute of Electrical and Electronics Engineers Conference Publications, 8076433, WOS: 000414282400326; Scopus: 2-s2.0-8503996656. — DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076433.
- Бузало Н.А. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния внецентренно сжатых стоек с повреждениями [Текст] / Н.А. Бузало, И.В. Гонтаренко // Наукоедение. — 2014. — № 1.
- Евтушенко С.И. Анализ напряжений несущего профиля вулканизационного пресса [Текст] / С.И. Евтушенко, В.Е. Федорчук, А.С. Алексеева, Б.А. Черныховский // Международная научно-техническая конференция «Строительство и архитектура: теория и практика международного развития, SATPID 2018; Ростов-на-Дону, Российская Федерация; 8–12 октября 2018 г.; Код 219729 // (2018) Materials Science Forum 931 MSF, pp. 200–206, Scopus: 2-s2.0-85055947052. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.200.
- Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81\*). УкрНИИпроектстальконструкция Госстроя СССР [Текст]. — М.: Стройиздат, 1987.
- СП 16.13330.2017 Стальные конструкции [Текст].

## References

1. GOST 27751-2014. Nadezhnost' stroitel'nykh konstrukcij i osnovanij. Osnovnye polozenija [GOST 27751-2014. Reliability of building structures and foundations. Basic provisions].
2. Rekomendacii po ocenke nadezhnosti stroitel'nykh konstrukcij zdaniij i sooruzhenij po vneshnim priznakam [Recommendations for assessing the reliability of building structures of buildings and structures by external signs]. *CNIIPromzdanij* [TsNIIPromzdanij]. Moscow: Gosstroj Publ., 2001.
3. Buzalo N.A., Kanunnikov A.V. Opredelenie koeficienta znachimosti stroitel'nykh konstrukcij pri ocenke tehničeskogo sostojanija zdaniij [Determination of the coefficient of significance of building structures in assessing the technical condition of buildings]. *Stroitel'stvo i rekonstrukcija. Orlovskij gosudarstvennyj universitet im. I.S. Turgeneva* [Construction and reconstruction. Oryol State University I.S. Turgenev]. Orel, 2018, I. 3, pp. 3–11.
4. Rekomendacii po obsledovaniju stal'nykh konstrukcij proizvodstvennykh zdaniij [Recommendations for the inspection of steel structures of industrial buildings]. *CNIIProektstal'konstrukcija* [TsNIIProektstalconstruksiya]. Moscow: Gosstroj SSSR Publ., 1988.
5. RD 22-01-97. Trebovanija k provedeniju ocenki bezopasnosti jekspluatacii proizvodstvennykh zdaniij i sooruzhenij podnadzornnykh promyshlennykh proizvodstv i obektov (obsledovanie stroitel'nykh konstrukcij specializirovannymi organizacijami) [RD 22-01-97. Requirements for assessing the safety of the operation of industrial buildings and structures of supervised industrial production and facilities (inspection of building structures by specialized organizations)]. Moscow: CNII «Proektstal'konstrukcija» Publ., 1997.
6. SP 13-102-2003. Pravila obsledovanija nesushhh stroitel'nykh konstrukcij zdaniij i sooruzhenij. Svod pravil po proektirovaniju i stroitel'stvu [SP 13-102-2003. Rules for the inspection of load-bearing building structures of buildings and structures. A set of rules for design and construction]. Moscow: Gosstroj Rossii Publ., GUL CPP Publ., 2003.
7. GOST R 53778-2010. Zdanija i sooruzhenija. Pravila obsledovanija i monitoringa tehničeskogo sostojanija. Obshhie polozenija [GOST R 53778-2010. Buildings and constructions. Rules for inspection and monitoring of technical condition. General Provisions]. Moscow: Standartinform Publ., 2010.
8. Astaf'ev V.I. Nakoplenie povrezhdennosti v metallah v usloviyah korrozionnogo rastreskivaniya pod naprjazheniem [Accumulation of damage in metals under stress corrosion cracking conditions]. *Izvestija AN RAN* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Russian Academy of Sciences]. MTT Publ., 1997, pp. 60–68.
9. Karpenko G.V. Vlijanie sredy na prochnost' i dolgovechnost' metallov [Influence of the environment of the strength and durability of metals]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1976. 125 p.
10. Vol'berg Ju.L., Korjakov A.S. Vlijanie agressivnykh sred na nesushhuju sposobnost' stroitel'nykh metallicheskih konstrukcij [The influence of aggressive media on the bearing capacity of building metal structures]. *Dolgovechnost' stroitel'nykh konstrukcij na Severe* [The durability of building structures in the North]. Jakutsk, 1981.
11. Augustin Ja., Shledzevskij E. *Avarii stal'nykh konstrukcij* [Accidents of steel structures]. Moscow, SI Publ., 1978. 175 p.
12. Ovchinnikov I.G. O metodologii postroenija modelej konstrukcij, vzaimodejstvujushhh s agressivnymi sredami. Opredelenie dolgovechnosti jelementov konstrukcij, vzaimodejstvujushhh s agressivnoj sredoj [On the methodology of constructing models of structures interacting with aggressive media]. *Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij* [Determination of durability of structural elements interacting with an aggressive environment]. 1982, I. 2, pp. 13–18.
13. Shutova M.N., Evtushenko S.I., Gontarenko I.V. Opredelenie nadezhnosti i kategorii tehničeskogo sostojanija povrezhdennykh metallicheskih konstrukcij na osnove chislennogo jeksperimenta [Determination of the reliability and the category of the technical condition of damaged metal structures on the basis of a numerical experiment]. *Izvestija VUZov Severo-Kavkazskij region. Tehniceskie nauki* [Izvestiya VUZov Severo-Kavkazskij region. Technical sciences]. 2018, I. 4, pp. 98–104. DOI: 10.17213/0321-2653-2018-4-98-104.
14. Evtushenko S.I., Alekseev S.A., Petrov I.A., Fedorchuk V.E. Ispol'zovanie MKJe pri raschete jelementov mashin [The use of FEM in the calculation of machine elements]. *14-ja mezhdunarodnaja «Dinamika tehničeskikh sistem»*. DTS 2018. *Don'skoj Gosudarstvennyj Tehniceskij Universitet, Rostov-na-Donu, Rossijskaja Federacija, 12–14 sentjabrja 2018 g.* [14<sup>th</sup> international “Dynamics of technical systems”. DTS 2018. Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation, September 12–14, 2018]. DOI: 10.1051/mateconf/201822604010.
15. Evtushenko S.I., Petrov I.A., Alekseev S.A., Alekseeva A.S. Optimizacija metallicheskoj plity s ispol'zovanie MKJe [Optimization of a metal plate using FEM]. *3-ja mezhdunarodnaja konferencija po promyshlennomu proektirovaniju, primeneniju i proizvodstvu, ICIEAM-2017-Cheljabinsk, Rossijskaja Federacija; 16–19 maja 2017* [3<sup>rd</sup> International Conference on Industrial Design, Application and Production, ICIEAM-2017-Cheljabinsk, Russian Federation; May 16–19, 2017]. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076433.
16. Buzalo N.A., Gontarenko I.V. Jeksperimental'noe issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija vncentrenno szhatykh stoek c povrezhdenijami [IV Experimental study of the stress-strain state of eccentrically compressed struts with damages]. *Internet-zhurnal Naukovedenie* [Internet-journal Naukovedenie]. 2014, I. 1.
17. Evtushenko S.I., Fedorchuk V.E., Alekseeva A.S., Chernyhovskij B.A. Analiz naprjazhenij nesushhego profilja vulkanizacionnogo pressa [Stress Analysis of the Carrying Profile of a Vulcanizing Press]. *Mezhdunarodnaja Nauchno-Tehniceskaja Konferencija Stroitel'stvo i Arhitektura: Teorija i Praktika Mezhdunarodnogo Razvitiya, CATPID 2018; Rostov-na-Donu, Rossijskaja Federacija* [International Scientific and Technical Conference Building and Architecture: Theory and Practice of International Development, CATPID 2018; Rostov-on-Don, Russian Federation; October 8–12]. 2018, pp. 200–206. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.931.200
18. Posobie po proektirovaniju usilenija stal'nykh konstrukcij (k SNiP II-23-81\*) [Manual for the design of reinforcement of steel structures (to SNiP II-23-81\*)]. *Ukrniiproektstal'konstrukcija Gosstroja SSSR* [UkrNIIProektstalconstruksiya Gosstroy USSR]. Moscow: Strojizdat Publ., 1987.
19. SP 16.13330.2017 *Stal'nye konstrukcii* [SP 16.13330.2017 “Steel structures”].