
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Металлургия и материаловедение

УДК 624.014.2

Оценка долговечности металлических конструкций производственных зданий с учетом деградации механических свойств сталей из-за коррозии

В.В. Филиппов*, К.П. Бережнов**

**Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск*

***Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск*

Показано, что при оценке долговечности металлических конструкций производственных зданий невозможно не учитывать фактор снижения механических свойств сталей под влиянием агрессивной среды (коррозии). Приведены результаты многолетних коррозионно-механических испытаний сталей марок 09Г2С и ВСт3сп5 в диапазоне климатических температур. При этом экспонирование образцов произведено в эксплуатационной среднеагрессивной среде цеха обогащения обогатительной фабрики алмазодобывающей промышленности. Выявлено, что при –60 °С и сроке экспонирования 2,5 года для сталей ВСт3сп5 и 09Г2С снижение механических свойств достигает, соответственно, следующих величин: 13,6; 13% – по пределу текучести; 9,0; 11% – по временному сопротивлению; 19,3; 15,3% – по относительному удлинению. Особое внимание уделено механизму процессов, приводящих к таким результатам. Предложена методика оценки долговечности металлоконструкций, которая заключается в отыскании момента времени, после которого уменьшение размеров поперечных сечений и падение прочности строительных сталей приводят к исчерпанию несущей способности конструкций. Представлены результаты расчетов долговечности конструкций, свидетельствующие о правомерности разработанного методического подхода.

Ключевые слова: долговечность конструкций, механические свойства, предел текучести, временное сопротивление, результаты расчета.

Assessment of Durability of Metal Constructions of Industrial Buildings with Taking into Account Corrosion-Related Degradation of Mechanical Properties of Steel

V.V. Filippov*, K.P. Berezhnov**

**The Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk*

***M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk*

It is shown that in case of assessment of durability of metal constructions of industrial buildings it is necessary to consider a factor of decrease of mechanical properties of steel under the influence of a hostile environment (corrosion). The results of long-term corrosion and mechanical testing of steels 09G2S and VSt3sp5 in the range of climatic temperatures are presented. The samples were exposed in the operational middle ag-

ФИЛИППОВ Василий Васильевич – чл.-корр. РАН, акад. АН РС (Я), anrsya@mail.ru; БЕРЕЖНОВ Константин Порфирьевич – к.т.н., доцент, kpberejnov@mail.ru.

gressive environment of enrichment plant concentrating shop of diamond-mining industry. It is revealed that in case of $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ and a term of exhibiting of 2,5 years the decrease in mechanical properties for steels VSt3sp5 and 09G2S reaches accordingly the following values: 13.6 and 13% by a fluidity limit; 9.0 and 11% by a temporary resistance; 19.3 and 15.3% by a relative lengthening. Special attention in the article is paid to the mechanism of the processes causing such results. A technique of assessment of durability of a metal-works which consists in determination of a moment after which a reduction of the sizes of cross sections and fall of durability of construction steels lead to exhaustion of the bearing capability of constructions is offered. The results of calculations of constructions durability confirming applicability of the developed methodical approach are provided.

Key words: durability of constructions, mechanical properties, fluidity limit, temporary resistance, results of calculation.

Введение

Анализ работ, направленных на изучение коррозионно-механической прочности сталей, показывает на существование множества теорий, объясняющих процессы, ухудшающие их механические характеристики в различных коррозионных средах. В работе [1] эти теоретические подходы подразделены на: механическую и адсорбционную теорию, которая изложена в основном в работах [2–9], механохимическую теорию растрескивания – [10, 11], водородную теорию – [12, 13], дислокационную – [2, 14], пленочную теорию – [2, 15]. Необходимо отметить, что перечисленные теории дают в основном качественную картину процессов воздействия агрессивных сред, приводящих к ухудшению механических характеристик сталей. Проведение прямых прочностных расчетов конструктивных элементов зданий, работающих в агрессивных средах, с использованием положений, изложенных в вышеперечисленных работах, достаточно затруднительно, порой невозможно. В связи с этим в данной статье излагается методика оценки долговечности стальных строительных конструкций (на примере объектов алмазодобывающей промышленности) с учетом утонения сечения элементов и изменения прочностных характеристик сталей из-за коррозионного износа.

Методика эксперимента

Исследования по изучению изменения прочности проводились для сталей марок ВСт3сп5 и 09Г2С после экспонирования образцов в эксплуатационной среднеагрессивной среде обогащенной фабрики алмазодобывающей промышленности. Испытания проводились при температурах 20° , -20° , -40° и $-60^{\circ}\text{ }^{\circ}\text{C}$ после различного срока экспонирования [16]. Статическое растяжение плоских образцов проводилось на испытательной машине «Instron». Механические свой-

ства и содержание основных химических элементов в рассматриваемых сталях удовлетворяют требованиям нормативных документов.

При выборе среды исходили из необходимости получения наиболее достоверных результатов испытаний. Известно, что даже тщательно подготовленные ускоренные камеральные исследования не могут в полной мере отражать действительное поведение сталей, эксплуатирующихся в натуральных условиях. Внутрицеховой испытательной средой принята наиболее характерная для обогащительных фабрик среда цеха обогащения, которая составляет 60–70% строительного объема фабрик. Кроме того, аналогичная среда характерна и для цехов других отраслей промышленности, таких как золотодобывающая, оловодобывающая и др. И, наконец, параметры среды цеха обогащения являются наиболее стабильными.

Результаты и обсуждение

По результатам механических испытаний установлено ухудшение механических характеристик на всем температурном интервале. При температурах $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ степень снижения механических свойств практически одинакова и за период 2,5 года хорошо согласуется с результатами других исследований. Однако характер расположения экспериментальных точек таков, что и в дальнейшем можно ожидать их постепенное понижение.

С падением температуры испытаний диапазон различия значений характеристик эталонных и экспонированных образцов увеличивается и при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и сроке экспонирования 2,5 года достигает, соответственно, для сталей ВСт3сп5 и 09Г2С: 13,6; 13,0% — по пределу текучести; 9,0; 11,0% — по временному сопротивлению; 19,3; 15,3% — по относительному удлинению. Расположение экспериментальных точек имеет четко выраженный монотонно убывающий вид (рис. 1–2).

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

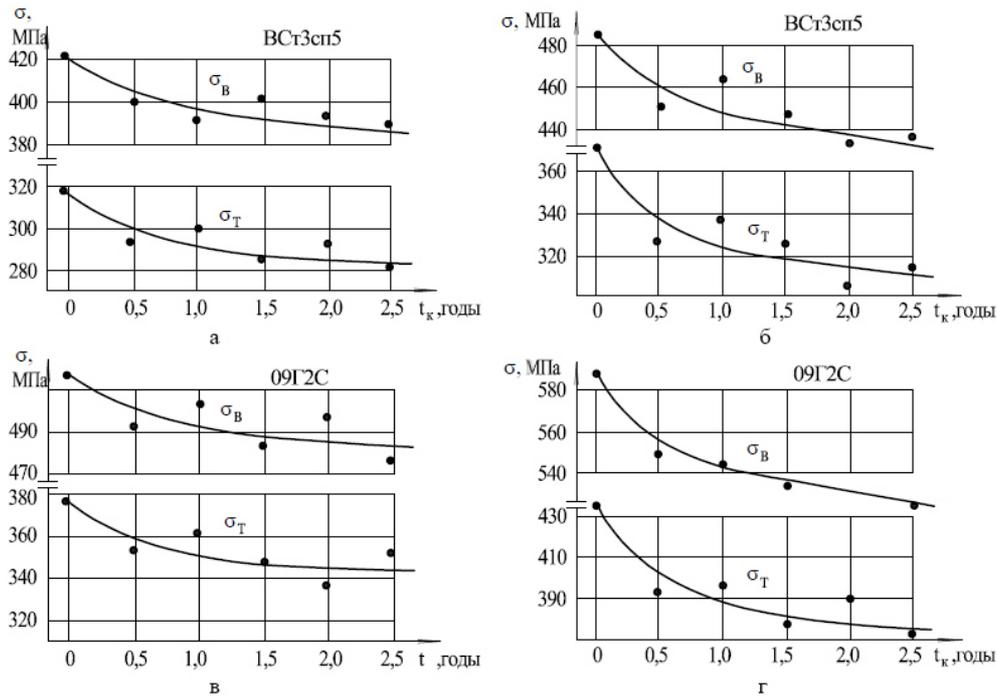


Рис. 1. Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией: а – 20 °С; б – -60 °С; в – 20 °С; г – -60 °С

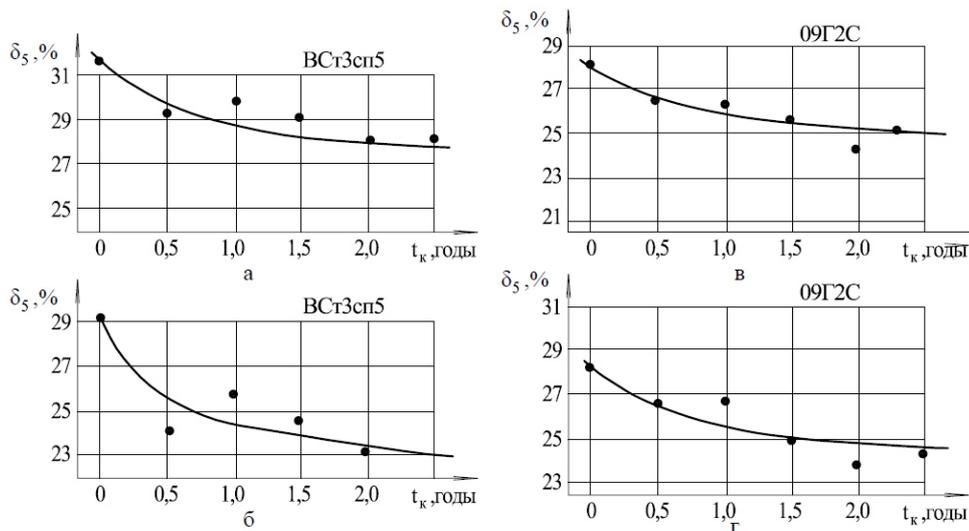


Рис. 2. Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией: а – 20 °С; б – -60 °С; в – 20 °С; г – -60 °С

Совместный анализ изменения прочностных характеристик (рис. 1), относительного удлинения (рис. 2) и результаты металлографических исследований указывают на наличие определенных закономерностей. Так, после 6 месяцев экспонирования образцов, когда коррозионные язвы более остры, снижения прочностных характеристик и относительного удлинения получаются более значительными, чем при последующих сроках экспонирования.

Поэтому гипотеза авторов работ [17, 18] о

механизме снижения прочностных характеристик и относительного удлинения сталей из-за состояния поверхности испытываемого образца является наиболее правдоподобной.

Действительно, из-за специфики технологии прокатки поверхностные слои металлопроката имеют большую прочность, чем глубинные. Коррозионный износ «разрыхляет» этот наиболее прочный поверхностный слой металлопроката.

Показатель разброса, т.е. коэффициент вариации механических характеристик сталей, при темпера-

туре 20 °С колеблется в пределах от 2,0 до 4,5%. Такая теснота показателя изменчивости, возможно, связана с тем, что образцы для испытаний изготовлены из листа одной плавки. С понижением температуры испытаний разброс характеристик несколько повышается и при температуре –60 °С для прочностных свойств составляет 6,3–8,6%, а для относительного удлинения – 8,8–9,9%.

После коррозионного износа значения коэффициентов вариации всех названных характеристик при всех температурах испытаний не остаются во времени постоянными, а имеют тенденцию постепенного повышения. Установлено, что рост коэффициентов вариации для прочностных характеристик в основном связан со снижением их математического ожидания, а для относительного удлинения еще и повышением среднеквадратического отклонения (стандарта). Стандарт прочностных свойств после коррозии оказался практически не зависимым от времени и зависящим только от температуры испытаний.

Анализ характера расположения значений экспериментальных точек указывает на существование определенной закономерности в их появлении. Наиболее близко зависимость прочностных характеристик от времени описывается функцией вида:

$$B_0 + B \cdot t_k^k, \quad (1)$$

где B_0 – предел текучести, временное сопротивление, МПа, установленные при определенной температуре для эталонных образцов; B – величина снижения предела текучести или временного сопротивления, МПа; t_k – продолжительность экспонирования; k – безразмерный эмпирический коэффициент.

Эмпирические коэффициенты определены с использованием программ регрессионного анализа. В табл. 1 приведены значения эмпирических параметров. Из 18 реализаций модели в 12 случаях при 10%-м уровне значимости достоверность описания результатов экспериментальных испытаний степенной моделью подтверждается. Разброс экспериментальных и теоретических значений для прочностных характеристик со-

составляет 2,0 –4,0 %, а для относительного удлинения – 3,0–6,0%. Итак, механические свойства сталей после коррозии в условиях фабрик алмазодобывающей промышленности не остаются во времени постоянными, а имеют тенденцию постепенного снижения. Выявленное явление нельзя не учитывать при оценке несущей способности, надежности и долговечности конструкции.

Имеющиеся экспериментальные материалы позволяют для подверженных коррозионному износу конструкций, функционирующих при естественных температурах (каркасы участков приема руд, транспортерных галерей и эстакад), снижать расчетные сопротивления сталей при проведении проверочных расчетов.

Расчет долговечности с учетом полученных результатов будет заключаться в отыскании момента времени, после которого потеря размеров сечения конструкций и падение прочности материалов приводят к наступлению предельного состояния первой группы. Тогда классическая форма записи обеспеченности несущей способности для корродирующих конструкций запишется в следующем виде:

$$\frac{P}{A \cdot (1 - \lambda \cdot C \cdot t_k^n)} \leq (B_0 + B \cdot t_k^k), \quad (2)$$

где P – усилие (N или M); A – геометрическая характеристика сечения конструкций (A или W); $\lambda = K_{cl} \cdot \beta$ при расчете на сжатие, растяжение, мм^{-1} , $\lambda = \psi_{x,y}$ – при расчете на изгиб, мм^{-1} , λ , K_{cl} , β , $\psi_{x,y}$ принимаются по данным [16, 19, 20]; C и n – эмпирические коэффициенты, описывающие процесс коррозионного износа [20]; t_k – продолжительность эксплуатации в годах; B_0 – физический предел текучести, МПа (табл.1); $B \cdot t_k^k$ – эмпирическая поправка, учитывающая снижение прочностных свойств стали из-за коррозии; B и k – параметры, значения которых приведены в табл.1.

Левая часть формулы (2) представляет собой временную функцию роста напряжения в конструкции за счет потери сечения из-за коррозионного износа, а правая – временная функция прочностных характеристик материала. Таким

Т а б л и ц а 1

| Марка стали | | Параметры функции $B_0 + B \cdot t_k^k$ | | | | | | | | |
|-------------|------------|---|-------------|-------|---------------|-------------|-------|---------------|-------------|-------|
| | | 20°С | | | – 40°С | | | – 60°С | | |
| | | B_0 , МПа,% | B , МПа,% | k | B_0 , МПа,% | B , МПа,% | k | B_0 , МПа,% | B , МПа,% | k |
| ВСт3сп5 | σ_B | 420,4 | -22,0 | 0,215 | 473,3 | -3,032 | 0,275 | 484,1 | -3,20 | 0,317 |
| | σ_T | 315,0 | -20,73 | 0,246 | 346,6 | -2,244 | 0,39 | 366,6 | -3,91 | 0,246 |
| | δ_5 | 31,5 | -2,488 | 0,279 | 30,0 | -4,168 | 0,145 | 29,1 | -4,678 | 0,202 |
| 09Г2С | σ_B | 518,0 | -22,18 | 0,228 | 577,9 | -4,176 | 0,108 | 589,2 | -4,762 | 0,342 |
| | σ_T | 377,4 | -21,40 | 0,246 | 425,9 | -3,777 | 0,174 | 437,9 | -4,56 | 0,235 |
| | δ_5 | 29,9 | -2,225 | 0,4 | 28,5 | -2,35 | 0,55 | 28,0 | -2,391 | 0,637 |

составляет 2,0 –4,0 %, а для относительного удли-

образом, определение долговечности сводится к

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

отысканию момента времени, соответствующего пересечению двух вышеназванных функций.

После постановки в формулу (2) вместо B_0 значения предела текучести стали и преобразований получим:

$$\sigma_n \leq (1 - \lambda \cdot C \cdot t_k^n) \cdot \left(\frac{1 + B \cdot t_k^k}{\sigma_T} \right), \quad (3)$$

где $\sigma_n = \sigma / \sigma_T$ – показатель относительного уровня напряженности конструкций (σ_n конструкций

составляет 0,5–0,75 [20]).

Результаты расчета долговечности конструкций при уровне относительной напряженности, равной 0,75, представлены в табл. 2.

В реальных условиях эксплуатации уровень относительной напряженности конструкций (σ_n) разный. Поэтому для оценки долговечности конструкций при разных σ_n составлены номограммы (рис.3).

Т а б л и ц а 2

Результаты оценки долговечности конструкций

| Цехи и отделения | Методика расчета | Долговечность конструкций, в годах | | | |
|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | балки перекрытий и рабочих площадок | | колонны средних рядов | |
| | | $\psi_x, \text{мм}^{-1}$ | $\psi_x, \text{мм}^{-1}$ | $K_{cl} \cdot \beta, \text{мм}^{-1}$ | $K_{cl} \cdot \beta, \text{мм}^{-1}$ |
| | | 0,177–0,140 | 0,130–0,09 | 0,130–0,11 | 0,10–0,08 |
| Цехи измельчения | По несущей способности (формула 3) | $\frac{36-46}{43-60}$ | $\frac{47-50}{\text{с.н.}}$ | $\frac{57-\text{с.н.}}{\text{с.н.}}$ | $\frac{\text{с.н.}}{\text{с.н.}}$ |
| | | $\frac{17-23}{20-27}$ | $\frac{24-27}{28-47}$ | $\frac{31-38}{42-46}$ | $\frac{40-52}{52-\text{с.н.}}$ |
| Отделения пенных сепараций | | $\frac{10-17}{13-21}$ | $\frac{19-35}{24-47}$ | $\frac{26-35}{37-48}$ | $\frac{41-54}{56-\text{с.н.}}$ |
| | | Бункерное отделение | $\frac{13-21}{17-26}$ | $\frac{23-40}{30-47}$ | $\frac{46-57}{\text{с.н.}}$ |

Примечание. В числителе — долговечность конструкций, изготовленных из стали ВСт3; в знаменателе — из стали 09Г2С; с.н. — свыше 60 лет.

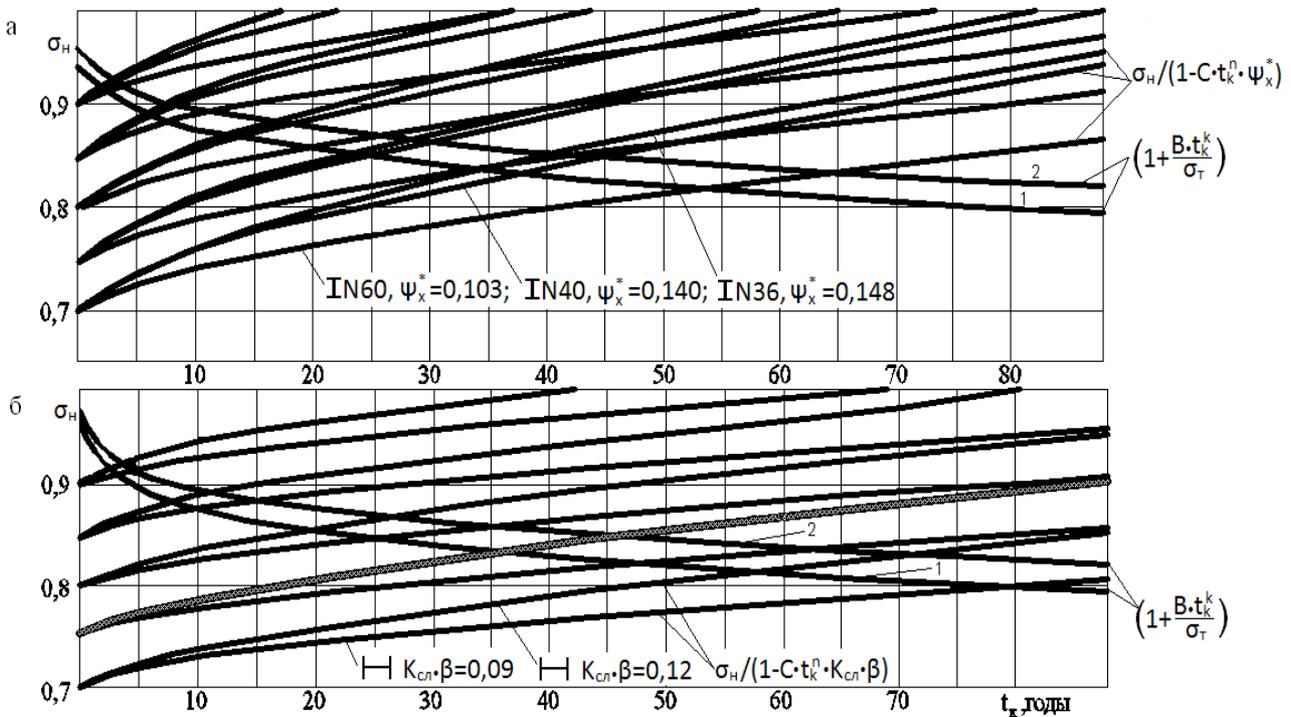


Рис. 3. Номограммы определения долговечности конструкций в условиях цехов фабрик алмазодобывающей промышленности: а – балки; б – колонны внутренних рядов; 1 – сталь ВСт3сп5; 2 – сталь 09Г2С

цехов алмазодобывающей промышленности

Заключение и выводы

Анализ результатов расчетной оценки долговечности (табл. 2) и реальных сроков эксплуатации конструкций, спустя более чем 30 лет, показывает достаточно близкое их схождение, в других случаях практически полное совпадение. Значительный разброс в некоторых случаях, превышающий 20%, может быть объяснен тем, что расчет производился при одном уровне относительной напряженности конструкций, а именно при уровне 0,75, тогда как уровень напряженности реальных конструкций самый разный и, как показывают натурные обследования, изменяется от 0,4 до 0,9.

Таким образом, достаточно близкая сходимость, совпадение результатов расчета с фактическим сроком службы конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах обогатительных фабрик, являются главным свидетельством жизнеспособности разработанного метода.

Литература

1. Харисов Р.А. Разработка научных основ экспресс-методов расчета характеристик прочностной безопасности оболочковых элементов трубопроводных систем в водородсодержащих средах: Автореф. дис. ... д.т.н. Уфа, 2015. 32 с.
2. Логан Х.Л. Коррозия металлов под напряжением / Х.Л. Логан. М.: Металлургия, 1970. 340 с.
3. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. М.: Наука, 1979. 744 с.
4. Школьник Л.М. Скорость роста трещин и живучесть металла / Л.М. Школьник. М.: Металлургия, 1973. 216 с.
5. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов / В.С. Золоторевский. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
6. Карпенко Г.В. Малоцикловая усталость стали в рабочих средах / Г.В. Карпенко, К.Б. Кацев, Н.В. Кокотайло [и др.]. Киев: Наукова думка, 1977. 110 с.
7. Карпенко Г.В. Физико-химическая механика конструкционных материалов / Г.В. Карпенко. Киев: Наукова думка, 1985. 228 с.
8. Коррозионная стойкость оборудования химических производств. Нефтеперерабатывающая промышленность: Справ. изд. / Под ред. Ю.И. Арчакова, А.М. Сухотина. Л.: Химия, 1990. 400 с.
9. Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В. Коррозия и защита от коррозии. М.: Физматлит, 2002. 336 с.
10. Харисов Р.А. Анализ защиты трубопроводов полимерными покрытиями / Р.А. Харисов, Ф.М. Мустафин, А.Р. Хабирова // Трубопроводный транспорт – 2005: Мат-лы Междунар. учебн.-научно-практ. конф. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2005. С. 237–239.
11. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии / Э.М. Гутман. М.: Металлургия, 1981. 271 с.
12. Стеклов О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах / О. И. Стеклов. М.: Машиностроение, 1976. 200 с.
13. Савин Г.Н. Справочник по концентрациям напряжений / Г.Н. Савин, В.Н. Тульчий. Киев: Вища школа, 1976. 412 с.
14. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
15. Капинос В.И. Роль адсорбционного, водородного и коррозионного факторов в зарождении и развитии коррозионно-усталостных трещин в конструкционных сталях различных структур: Автореф. дис. ... к.т.н. Львов, 1982. 20 с.
16. Эксплуатационная надежность металлических конструкций и сооружений производственных зданий в экстремальных условиях Севера / Под ред. чл.-корр. РАН В.В. Филиппова. М.: Физматлит, 2012. 436 с.
17. Вольберг Ю.Л., Нахапетян Х.А., Одесский П.Д. Изменение прочности строительных сталей в агрессивных средах промышленных зданий // Промышленное строительство. 1974. №10. С.29–32.
18. Коряков А.С. Несущая способность стальных конструкций, эксплуатирующихся в агрессивных средах цехов цветной металлургии: Автореф. дис. ... к.т.н. М., 1985. 20 с.
19. Иванов П.М. Прогнозирование долговечности элементов стальных стропильных форм покрытия промышленных зданий с агрессивной средой: Автореф. дис. ... к.т.н. М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1982. 20 с.
20. Бережнов К.П. Долговечность стальных конструкций в условиях обогатительных фабрик алмазодобывающей промышленности: Автореф. дис. ... к.т.н. М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1987. 20 с.

Поступила в редакцию 03.10.2016