УДК 69.059.032:539.4

DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.60-64

Использование критерия местной прочности при проектировании узлов подкрановых конструкций

Владимир Васильевич ЕВДОКИМОВ, кандидат технических наук, зам. директора, e-mail: v.evdokimov@stako.ru

Денис Евгеньевич ГОЛУБЕВ, главный инженер проекта, начальник отдела промышленных и гражданских сооружений, e-mail: d.golubev@stako.ru

Вадим Владимирович КОСЕНКОВ, ведущий инженер, e-mail: v.kosenkov@stako.ru

Алексей Владимирович ШУРИНОВ, ведущий инженер, e-mail: a.shurinov@stako.ru

ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 117997 Москва, ул. Архитектора Власова, 49

Аннотация. *В статье рассмотрена методика расчета, использованная при проектировании соединений (узлов) циклически нагруженных элементов металлоконструкций подкрановой фермы для мостовых опорных кранов с тяжелым режимом работы. Указаны причины, по которым не могут быть использованы традиционные методы расчета на усталость соединений элементов металлоконструкций, принятые в действующих отечественных и зарубежных нормативных документах. Дано обоснование целесообразности использования методики расчета на усталость, основанной на критерии местной прочности, при проектировании узлов сложной геометрической формы. Наглядно проиллюстрировано влияние внесенных изменений в конструкцию узла на напряженное состояние в зонах потенциального трещинообразования. Это позволило решить задачу выбора оптимальных конструктивных решений наиболее нагруженных узлов, лимитирующих усталостную долговечность конструкции в целом, а также проблему обеспечения периода эксплуатации подкрановой фермы не менее 10 лет до зарождения усталостных трещин при существующих в настоящее время режимах нагружения.*

Ключевые слова: *подкрановые конструкции (фермы), концентрация напряжений, усталостные трещины, долговечность, проектирование узлов сложной геометрической формы, методики расчета на усталость, критерий местной прочности, оптимальные конструктивные решения.*

USING THE CRITERION OF LOCAL STRENGTH IN THE DESIGN OF UNITS OF CRANE STRUCTURES

Vladimir V. EVDOKIMOV, e-mail: v.evdokimov@stako.ru

Denis E. GOLUBEV, e-mail: d.golubev@stako.ru

Vadim V. KOSENKOV, e-mail: v.kosenkov@stako.ru

Alexey V. SHURINOV, e-mail: a.shurinov@stako.ru

Melnikov Central Research and Design Institute of Steel Structures, ul. Arkhitektora Vlasova, 49, Moscow 117997, Russian Federation

Abstract. *The article considers the calculation method used in the design of joints of cyclically loaded elements of metal structures of a crane truss for bridge support cranes of the 7K operating mode. The reasons why traditional methods of calculating the fatigue of metal structures elements joints, adopted in current national and foreign regulatory documents, cannot be used are indicated. The feasibility of using the fatigue calculation method based on the local strength criteria in the design of complex geometric joints is justified. The influence of the changes made to the design of the joint on the stress state in the zones of potential crack formation is clearly illustrated. This made it possible to solve the problem of choosing the optimal design solutions for the most loaded joints that limit the fatigue life of the structure as a whole, and ensuring the period of operation of the crane truss before the onset of fatigue cracks for at least 10 years under the current loading modes.*

Key words: *crane structures (trusses), stress concentration, fatigue cracks, durability, design of complex geometric units, fatigue calculation methods, local strength criterion, optimal design solutions.*

Подкрановые металлоконструкции в цехах металлургических производств с тяжелым и весьма тяжелым режимами работы мостовых кранов (группы 7К и 8К) эксплуатируются в условиях циклического режима нагружения, при котором возможно образование усталостных трещин в зонах конструктивной концентрации напряжений [1, 2]. Согласно требованиям, изложенным в разд. 12 СП 16.13330.2017 «СНиП II-23-81* Стальные конструкции», для таких конструкций необходимо выполнять поверочные расчеты на усталость. Методика расчета на усталость предполагает наличие данных о расчетных сопротивлениях усталости R_v для различных видов соединений элементов металлоконструкций натурной толщины, определяемых на основании ре-

© ЕВДОКИМОВ В. В., ГОЛУБЕВ Д. Е., КОСЕНКОВ В. В., ШУРИНОВ А. В., 2020

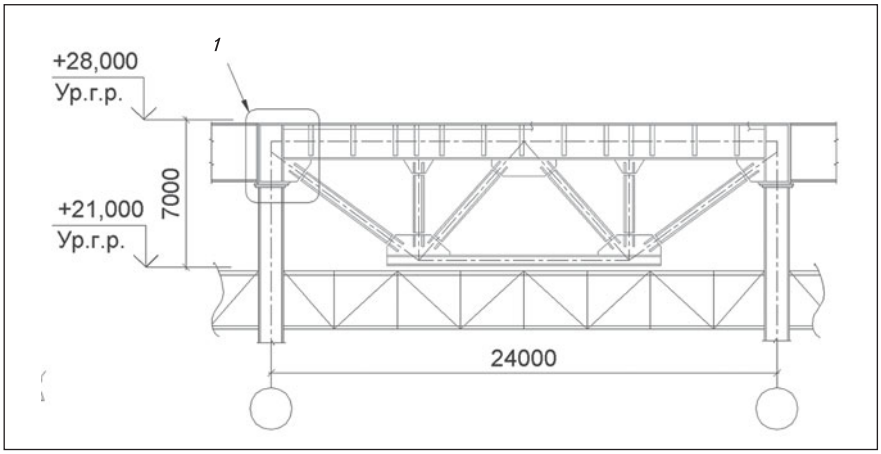

Рис. 1. ***Геометрическая схема фермы (1 — опорный узел)***

зультатов испытаний этих соединений в условиях циклического режима нагружения. Однако в СП 16.13330 и других нормативных документах [3, 4], а также рекомендациях по их использованию [5] приведены значения расчетных сопротивлений усталости для относительно простых видов соединений, которые не могут быть использованы для расчетной оценки усталостной прочности и долговечности реальных соединений (узлов) более сложной геометрической формы.

Следует отметить, что проведение испытаний узлов сложной геометрической формы при циклическом нагружении с целью получения значений R_v, необходимых для расчета на усталость согласно СП 16.13330, представляет собой крайне трудоемкую или практически невыполнимую задачу.

Значения расчетного сопротивления усталости сварных узлов сложной геометрической формы зависят от двух факторов, определяющих уровень концентрации напряжений в зонах возможного образования трещин:

- формы и геометрических размеров конструктивных элементов узла;
- формы и геометрических размеров сварных швов в зоне соединения элементов узла [6].

Дифференцированный учет влияния этих двух факторов на уровень концентрации напряжений и долговечность циклически нагруженных узлов сложной геометрической формы возможен при использовании методики расчета, основанной на критерии местной прочности и используемой при расчете на усталость элементов конструкций атомных энергетических установок [7]. Согласно этой методике число циклов нагружения до зарождения усталостных трещин в рассматриваемом элементе конструкции определяется по расчетной кривой усталости металла в зоне возможного зарождения трещин на основании данных о амплитуде местных переменных напряжений в цикле нагружения в зоне потенциального трещинообразования.

Сопротивление усталости элемента конструкции при заданном количестве циклов нагружения будет обеспечено, если выполняется следующее условие прочности:

$$\sigma_a^* \leqslant [\sigma_a^*]; \qquad (1)$$

где σ_a^* — амплитуда местных напряжений в зоне их концентрации в цикле нагружения (половина разности между максимальным и минимальным напряжением в цикле), МПа; $[\sigma_a^*]$ — допускаемая амплитуда местных напряжений в цикле нагружения, МПа.

Допускаемая амплитуда местных напряжений $[\sigma_a^*]$ определяется как наименьшая величина, вычисляемая по формулам:

$$[\sigma_a^*] = \frac{Ee_c}{n_\sigma (4N_0)^m} + \frac{R_c}{n_\sigma\left[(4N_0)^{m_e} + \frac{1+r}{1-r}\right]}; \qquad (2)$$

$$[\sigma_a^*] = \frac{Ee_c}{(4n_N N_0)^m} + \frac{R_c}{(4n_N N_0)^{m_e} + \frac{1+r}{1-r}}; \qquad (3)$$

где n_σ и n_N — коэффициенты запаса прочности по напряжениям и числу циклов соответственно; m и m_e — характеристики материала; r — коэффициент асимметрии цикла напряжений; R_c — характеристика прочности металла, МПа; e_c — характеристика пластичности металла; E — модуль упругости при расчетной температуре (E = 1,95·10^5 МПа); N_0 — число циклов нагружения до зарождения усталостных трещин.

Значения m, m_e, R_c, e_c и E определяются в соответствии с [7].

Коэффициент асимметрии цикла напряжений r вычисляется по формуле

$$r = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}, \qquad (4)$$

где $\sigma_{\min}$ и $\sigma_{\max}$ — соответственно наименьшее и наибольшее местное напряжение в зоне концентрации от эксплуатационной нагрузки в цикле нагружения.

При наличии в зоне потенциального трещинообразования растягивающих остаточных напряжений от сварки, которые суммируются с местными напряжениями от внешней нагрузки, значение r определяют по формуле

$$r = \frac{R_{yn} - 2\sigma_a^*}{R_{yn}}, \qquad (5)$$

где R_{yn} — предел текучести стали, МПа, согласно СП 16.13330.

Согласно [7] эксплуатационная надежность элемента конструкции до зарождения усталостных трещин при заданном числе

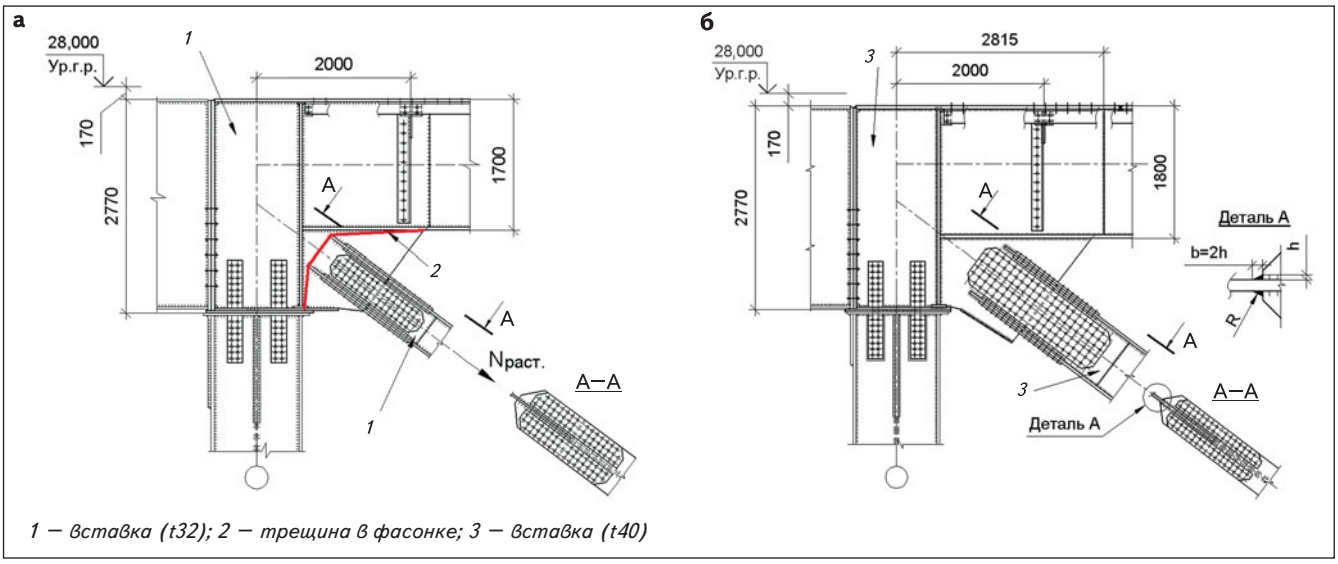

Рис. 2. ***Первоначальная (а) и усиленная (б) конструкция опорного узла подкрановой фермы***

циклов нагружения N_0 будет обеспечена, если условие прочности (1) выполняется при $n_\sigma = 2$ и $n_N = 10$.

Данный подход к оценке сопротивления усталостному разрушению элементов конструкций на основе критерия местной прочности авторами статьи был успешно использован на стадии проектирования подкрановой фермы для мостовых опорных кранов грузоподъемностью $Q = 520 + 100/20$ т режима работы 7К при выборе оптимальных геометрических размеров и формы элементов конструкции наиболее нагруженных узлов.

Проект подкрановой фермы разрабатывался для замены фермы схожей геометрии, в которой через три года после начала эксплуатации были выявлены усталостные трещины в наиболее нагруженных узлах, включая узел сопряжения опорного раскоса и верхнего пояса подкрановой фермы (опорный узел фермы), расчет которого будет более подробно рассмотрен далее.

Расчет выполнялся с учетом постоянных и временных нагрузок на подкрановые конструкции, собранных и приложенных в расчетной схеме в соответствии с СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия». При этом принималось уменьшенное значение вертикальной нагрузки от одного крана в наиболее невыгодном положении согласно п. 9.20 СП 20.13330. Для определения напряженного состояния опорного узла в зонах конструктивной концентрации напряжений использован программный комплекс ANSYS. Моделирование узла проводилось в составе общей расчетной схемы подкрановой фермы.

Геометрическая схема фермы представлена на *рис. 1,* а первоначальная конструкция опорного узла подкрановой фермы – на *рис. 2а.*

Соединение опорного раскоса с фасонкой в опорном узле – жесткое на высокопрочных болтах и двухсторонних накладках. Фасонка представляет собой лист – вставку увеличенной толщины t (в сравнении с толщиной стенки верхнего пояса), которая «прорезает» нижнюю полку верхнего пояса фермы и одну из полок (опорное ребро) «стоечной части» узла. Фасонка имеет приемные ребра для соединения с полками опорного раскоса и образования жесткого соединения. При этом приемные ребра не соединены с нижней полкой верхнего пояса и опорным ребром фермы для предотвращения в данных элементах расслоя (от растягивающих усилий в опорном раскосе).

Образование усталостных трещин в опорном узле на ранних стадиях эксплуатации подкрановой фермы при количестве циклов нагружения в год $n_1 = 65700$ происходило в местах наибольшей концентрации напряжений у торцов приемных ребер фасонки. С течением времени трещины соединялись между собой и распространялись вдоль угловых швов приварки фасонки к верхнему поясу фермы и опорному ребру (*см. рис. 2а*).

Максимальные значения напряжений по Мизесу в первоначальном варианте опорного узла приведены на *рис. 3а.*

Расчеты показали, что величина местных напряжений в зоне трещинообразования в подкрановой ферме достигала $0{,}7R_{yn}$, а их амплитуда в цикле нагружения – $0{,}34R_{yn}$, при этом условие прочности (1) выполняется для периода эксплуатации конструкции не более трех лет.

Для увеличения долговечности

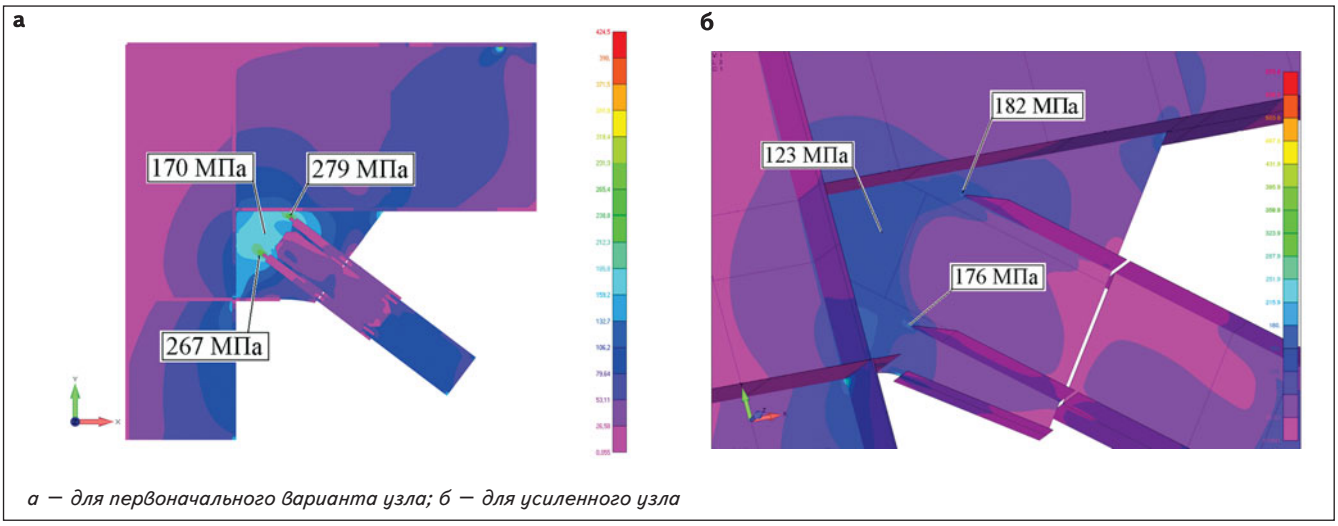

Рис. 3. ***Максимальные значения напряжений по Мизесу в цикле нагружения, МПа***

до 10 лет на стадии до зарождения усталостных трещин в конструкцию опорных узлов был внесен ряд изменений, имеющих целью снижение уровня концентрации напряжений и размаха местных напряжений в цикле нагружения в зонах потенциального трещинообразования, а именно:

- увеличена толщина и габаритные размеры фасонки опорного узла;
- сечение опорного раскоса изменено таким образом, чтобы уменьшить отношение площадей полок к площади стенки («старое» и «новое» сечения опорного раскоса приведены на *рис. 4*);
- увеличено расстояние от торцов приемных ребер фасонки до нижней полки верхнего пояса и до опорного ребра фермы;
- двухсторонние накладки по стенке опорного раскоса выведены за торцы приемных ребер фасонки;
- помимо постепенного уменьшения площади сечения приемных ребер в их торцах, также предусмотрено выполнение пологих сварных швов.

Аналогичные мероприятия были приняты при проектировании прочих узлов подкрановой фермы, подверженных образованию в них усталостных трещин. При этом проводился количественный анализ влияния различных изменений в конструкции узлов на величину амплитуды местных напряжений в зоне потенциального трещинообразования в цикле нагружения подкрановой фермы.

Кроме перечисленного, проектом был предусмотрен ряд мероприятий, направленных на уменьшение сварочных напряжений в зоне возможного развития усталостных трещин, а конструкция подкрановой фермы в целом была усилена и доработана с целью соответствия требованиям современных норм и уменьшения влияния воздействий кранов, работающих в смежных пролетах.

Усиленная (измененная) конструкция опорного узла представлена на *рис. 2б*. Максимальные значения напряжений по Мизесу в усиленном варианте опорного узла приведены на *рис. 3б*.

Таким образом, использование рассмотренной методики, основанной на критерии местной прочности, позволило решить задачу выбора оптимальных конструктивных решений наиболее нагруженных узлов подкрановой фермы для мостовых опорных кранов грузоподъемностью $Q =$ 520 + 100/20т режима работы 7К, лимитирующих усталостную долговечность конструкции в целом.

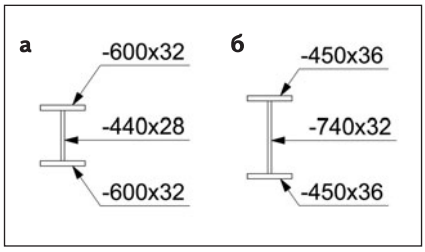

Рис. 4. ***«Старое» (а) и «новое» (б) сечения опорного раскоса***

Вывод

Разработана методика выбора оптимальных конструктивных решений циклически нагруженных соединений (узлов) элементов подкрановой фермы с целью обеспечения требуемой долговечности конструкции. Данная методика может быть рекомендована проектировщикам для выполнения поверочных расчетов на усталость других циклически нагруженных строительных металлоконструкций, для которых в нормативной документации и технической литературе отсутствуют данные о расчетном сопротивлении усталости наиболее нагруженных узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Еремин К. И., Шульга С. Н.* Закономерность повреждений подкраново-подстропильных ферм на стадии эксплуатации // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 4. С. 34–36.
2. *Еремин К. И., Шульга С. Н.* Моделирование развития усталостных повреждений в подкраново-подстропильных фермах // Вестник МГСУ. 2014. № 2. С. 30–38.
3. СТО 02494680-0049-2005. Стандарт организации. Конструкции стальные строительные. Основные принципы расчета на прочность, устойчивость, усталостную долговечность и сопротивление хрупкому разрушению. М. : ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 2005. 32 с.
4. EN 1993-1-9:2005. Еврокод 3: Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-9. Усталостная прочность. Минск, 2010. 44 с.
5. *Евдокимов В. В.* Совершенствование метода расчетной оценки усталостной долговечности элементов стальных строительных конструкций на основе сопоставления российских и европейских норм // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 12. С. 17–19.
6. *Евдокимов В. В., Щербаков Е. А.* К вопросу повышения расчетной долговечности элементов конструкции подкрановых балок // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 5. С. 28–30.
7. ПНАЭ Г-7-002-86. Правила и нормы в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М. : Энергоатомиздат, 1989. 524 с.

REFERENCES

1. Eremin K. I., Shul'ga S. N. Regularity of damages of crane secondary truss during their exploitation. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2013, no. 4, pp. 34–36. (In Russian).
2. Eremin K. I., Shul'ga S. N. The simulation of the development of fatigue damage in crane-podstropilnyh farms. *Vestnik MGSU*, 2014, no. 2, pp. 30–38. (In Russian).
3. STO 02494680-0049-2005. *Standart organizacii. Konstrukcii stal'nye stroitel'nye. Osnovnye principy rascheta na prochnost', ustojchivost', ustalostnuyu dolgovechnost' i soprotivlenie hrupkomu razrusheniyu* [Standard of organization. Steel construction structures. Basic principles of calculation for strength, stability, fatigue life and brittle fracture resistance]. Moscow, ZAO «CNIIPSK im. Mel'nikova» Publ., 2005. 32 p. (In Russian).
4. EN 1993-1-9:2005. Evrokod 3: *Proektirovanie stal'nyh konstrukcij* [Design of steel structures]. Vol. 1-9. *Ustalostnaya prochnost'* [Fatigue strength]. Minsk, 2010. 44 p. (In Russian).
5. Evdokimov V. V. Improving the method for calculation assessment of fatigue life of steel building structures elements on the basis of comparison of russian and european Standards with Eurocodes. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2013, no. 12, pp. 17–19. (In Russian).
6. Evdokimov V. V., Shcherbakov E. A. On the problem of rise in design durability of elements of crane beam construction. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2008, no. 5, pp. 28–30. (In Russian).
7. PNAE G-7-002-86 *Pravila i normy v atomnoj energetike. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniya i truboprovodov atomnyh energeticheskih ustanovok* [Rules and regulations in the nuclear power industry. Standards for calculating the strength of equipment and pipelines of nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 524 p. (In Russian).

Для цитирования: *Евдокимов В. В., Голубев Д. Е., Косенков В. В., Шуринов А. В.* Критерий местной прочности при проектировании узлов подкрановых конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 10. С. 60–64. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.60-64.

For citation: Evdokimov V. V., Golubev D. E., Kosenkov V. V., Shurinov A. V. Using the Criterion of Local Strength in the Design of Units of Crane Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2020, no. 10, pp. 60–64. (In Russian).
DOI: 10.33622/0869-7019.2020.10.60-64.

ЖУРНАЛ «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» ИНДЕКСИРУЮТ:

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ БИБЛИОТЕКА eLIBRARY.RU

Russian Science Citation Index (RSCI) на платформе Web of Science

ULRICHSWEB™ GLOBAL SERIALS DIRECTORY

САЙТ ЖУРНАЛА «ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО»: **www.pgs1923.ru**