УДК 624.014.2:539.563

Е.А. Мойсейчик*ФГБОУ ВПО «НГАСУ» (Сибстрин)***ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ
ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
РЕГУЛИРОВАНИЕМ
ЛОКАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ
НАПРЯЖЕНИЙ
И ДЕФОРМАЦИЙ**

Приведена классификация методов повышения хладостойкости стальных конструктивных форм с акцентированием внимания на регулировании локальных полей внутренних напряжений и деформаций для предотвращения хрупкого разрушения стальных конструкций. Показана необходимость применения компьютерной термографии не только для визуализации температурных полей на поверхности, но и для управления полями остаточных напряжений и деформаций в контролируемом элементе.

Ключевые слова: стальные конструкции, хрупкое разрушение, локальные поля, деформации, напряжения, регулирование хладостойкости, компьютерная термография.

Нормы проектирования, изготовления и монтажа предусматривают ряд требований и рекомендаций к выбору материалов и конструктивных форм, направленных на предотвращение хрупкого разрушения стальных конструкций [1—3]. В основу таких предписаний положены представления о хрупком разрушении стальных конструктивно-технологических форм (КТФ) при фиксированных температурах как многофакторном явлении [4]. При этом в качестве определяющих факторов хладостойкости выделяются концентрация напряжений, масштаб-

Е.А. Moyseychik*NSUACE (Sibstrin)***PREVENTION
OF BRITTLE FRACTURE
OF STEEL STRUCTURES
BY CONTROLLING
THE LOCAL STRESS
AND STRAIN FIELDS**

In the article the author offers a classification of the methods to increase the cold resistance of steel structural shapes with a focus on the regulation of local fields of internal stresses and strains to prevent brittle fracture of steel structures. The need of a computer thermography is highlighted not only for visualization of temperature fields on the surface, but also to control the fields of residual stresses and strains in a controlled element.

Key words: steel structures, brittle fracture, local fields, strain, stress, regulation of cold resistance, computer thermography.

The norms of design, production and installation suppose a set of requirements and recommendations to the choice of materials and construction forms aimed at prevention of brittle fracture of steel structures [1—3]. In the basis of such requirements lies an idea of the brittle fracture of steel construction and technological forms (CTF) at fixed temperatures as multifactorial phenomenon [4]. In this case strain concentration, size effect and level of residual strains are considered to be determining factors (fig. 1). In [4] the decrease of these factors influence is considered to be the main principles of cold resistant structures design (fig. 1). The design condition (2) of a brittle strength is tested under the con-

ный фактор и уровень остаточных напряжений (рис. 1). В [4] снижение воздействия указанных факторов рассматривается в качестве основных принципов проектирования хладостойких конструкций (рис. 1). Расчетное условие (2) хрупкой прочности проверяют при условии, что расчетная температура среды T_w ниже первой критической температуры T_{cr1} . Исходя из этих принципов, был разработан комплекс мероприятий [4] (рис. 2), направленных на повышение хладостойкости стальных строительных конструкций при их проектировании, изготовлении, транспортировке, монтаже и эксплуатации [1—4]. Набор рекомендаций, мероприятий по каждой из семи групп (рис. 3) основывается на данных анализа аварий стальных конструкций и результатах экспериментальных исследований хладостойкости стальных конструкций [3—8].

dition that the design temperature of the environment T_w is lower, than the first critical temperature T_{cr1} . Basing on these principles [4] a complex of measures was developed (fig. 2), aimed at raising cold resistance of steel building structures at their design, production, transporting, installation and operation [1—4]. The set of recommendations, measures on each of the 6 groups (fig. 3) is based on analysis data of steel structures crashes and on the results of experimental studies of cold resistance of steel structures [3—8].

Рис. 1. Зоны зарождения разрушения в КТФ пониженной хладостойкости (типы А—Е) (а) и современная схема обеспечения хрупкой прочности растянутых стальных элементов конструкций (б)

Fig. 1. Areas of failure initiation in CTF of a lowered cold resistance (types A—F) (a) and modern scheme of providing brittle strength of tensile steel elements and structures (b)

Рис. 2. Принципиальные пути повышения хладостойкости стальных конструкций

Fig. 2. Principal methods of cold resistance increase of steel structures

К первой группе (рис. 3) можно отнести рекомендации, направленные на выявление конструктивных форм пониженной хладостойкости в структуре конструкции и доведение

In the first group (fig. 3) we can name the recommendations aimed at revealing the constructive forms of lowered cold resistance in a structure and bringing their properties to the re-

их характеристик до требуемых для конкретных условий. Таких, как расчетно-экспериментальное обоснование хладостойкости, замена КТФ пониженной хладостойкости на более хладостойкие. Например, применение вместо сварных соответствующих соединений на высокопрочных болтах. Сплошностенчатых конструкций вместо сквозных, оптимизация параметров сварных соединений и узлов для повышения их хладостойкости и др.

quired for certain conditions, such as design-experimental justification of cold resistance, substitution of construction- technological forms with more cold resistant. For example, the use of corresponding junctions on friction grip bolts instead of welded ones, web plate structures instead of open-type, optimization of the parameters of welded joints and assemblies for raising their cold resistance, etc.

Рис. 3. Группы конструктивно-технологических мероприятий по повышению хладостойкости стальных конструкций

Fig. 3. Groups of constructive-technological measures for increasing cold resistance of steel building structures

Мероприятия второй группы (см. рис. 3) направлены на повышение хладостойкости выявленных при анализе аварий КТФ пониженной хладостойкости. По классификации А.В. Сильвестрова [4] выделяется шесть типов таких

The measures of the second group (fig. 3) are aimed at raising cold resistance of the CTF with the lowered cold resistance revealed after the analysis of accidents. According to the classification of A. V. Silvestrov

конструктивных форм (см. рис. 1). Смещение величины первой критической температуры T_{cr1} в сторону более низких температур для них достигается в основном за счет снижения уровня концентрации в зонах предразрушения. Для таких конструктивных форм по методикам НИСИ, ЦНИИПСК [4] можно расчетным путем определить T_{cr1} . В методе деконцентрации напряжений во многом используются конструктивные решения аналогичные применяемым для повышения усталостной прочности стальных конструкций.

К третьей группе (см. рис. 3) можно отнести мероприятия по повышению работоспособности стального каркаса здания, сооружения с использованием методов теорий надежности и живучести [9, 10]. Среди них: установка дополнительных связей по покрытию здания, распределяющих нагрузку с аварийной конструкции на смежные; использование приемов теории надежности систем (резервирование, замена последовательного соединения конструктивных элементов параллельным и др.).

Мероприятия четвертой группы (см. рис. 3) направлены на регулирование полей рабочих и начальных напряжений и деформаций. На создание начальных напряжений в конструктивной форме, противоположных по знаку напряжениям от расчетной нагрузки или на снижение величины остаточных технологических напряжений одного знака к расчетным в зонах предразрушения. На снижение остаточных сварочных напряжений и деформаций, создание полей сжимающих напряжений в зонах предразрушения и др. [11—14]. Частным случаем этой группы можно считать метод деконцентрации напряжений [4].

Мероприятия пятой и шестой групп (см. рис. 3) относятся к стадиям изготовления, транспортирования, складирова-

[4] 6 types of such constructive forms can be distinguished (see fig. 1). Value shift of the first critical temperature T_{cr1} to lower temperatures is obtained for them generally by decrease of concentration level in fracture process zones. It is possible to calculate T_{cr1} for such constructive forms using the methods of the Central Scientific Research Institute of Building Structures [4]. In the method of strain deconcentration mostly the constructive solutions are used, which are similar to the solutions applied for raising the fatigue strength of steel structures.

In the third group (see fig. 3) we can name the measures to raise the operation capacity of steel building skeleton using the methods of reliability theory [9, 10]. Among them are: additional bracing for covering the building, which distribute the load of the emergency structure to the adjusting ones; the use of system reliability theory methods (redundance, substitution of joining up in series by parallel jointing, etc).

The measures of the fourth group (see fig. 3) are aimed at controlling the fields of operational and initial stresses and strains; at creation of the initial fields in a constructive form, which are opposite in sign to stresses of the designed load or at lowering the value of residual technological strains one sign to the designed in fracture process zones; at decrease of residual welding stress and strain, creation of compressing stress fields in fracture process zones, etc. [11—14]. A special case of this group is stress deconcentration method [4].

The measure of the fifth and sixth groups (see fig. 3) are related to the stages of production, transporting, storage and erection of steel structures

ния и монтажа стальных конструкций и направлены на устранение технологических дефектов, вызывающих снижение хладостойкости конструкций.

Мероприятия седьмой группы (см. рис. 3) направлены на предотвращение дефектов, понижающих хладостойкость эксплуатируемых конструкций (ремонтные, эксплуатационные, коррозионные и др.) и установление мониторинга напряженно-деформированного состояния конструктивных форм высокоответственных сооружений.

Из нормативных источников [1—3], литературных данных [4—8] следует, что наиболее разработаны методы первой и второй групп (см. рис. 3). Методы третьей группы активно развиваются в настоящее время в рамках теорий надежности [10], прогрессирующего обрушения, живучести конструкций [9], управляемых конструкций [15].

Также некоторое развитие получили методы четвертой группы, направленные на регулирование напряжений и деформаций в элементах конструкций. Следует отметить, что регулирование напряжений в элементах строительных металлоконструкций можно осуществлять по двум направлениям (рис. 4). Методы искусственного регулирования напряжений (первое направление, рис. 4) проанализированы и классифицированы В.В. Бирюлевым [4]. Их отличительным признаком является то, что перечисленными в [4] методами регулируются внутренние усилия в сечениях конструктивной системы, конструкции или ее части, а напряжения в точках сечений функционально зависят от внутренних усилий.

Методы второго направления (рис. 4) не изменяют эпюр внутренних усилий от расчетных нагрузок и соответствующих напряжений в сечениях. Они воздействуют на поля местных и начальных напряже-

and are aimed at correction of technological defects, causing decrease of cold resistance of structures.

The measure of the seventh group (see fig. 3) are aimed at defect prevention, which decrease the cold resistance of operating structures (repair, operational, corrosion and other defects) and monitoring of stress-strain state of construction forms of high responsibility structures.

The regulatory sources [1—3] and literature data [4—8] show, that the methods of the 1st and 2nd groups are mostly developed (see fig. 3). The methods of the 3rd group are being actively developed nowadays in frames of the theories reliability [10], progressive collapse, design survivability [9], controlled structures [15].

Also the methods of the 4th group, which are aimed at controlling the stresses and strains in construction elements, gained some development. We should note, that stress in the elements of metal structures elements may be controlled in two directions (fig. 4). The methods of artificial stress control (the first direction, fig. 4) have been analyzed and classified by V.V. Biryulev [4]. Their distinctive feature is that the methods enumerated in [4] regulate internal forces in the cross sections of a construction system, structure or its part, and the stresses in cross section points functionally depend on outer forces.

Methods of the second direction (fig. 4) don't change the diagram of internal forces from designed loads and the corresponding stresses in cross sections. They influence the fields of local and initial stresses.

ний. Метод деконцентрации напряжений, разработанный под руководством А.В. Сильвестрова [4], соответствует идее создания плавных переходов силовых потоков в смежных сечениях КТФ пониженной хладостойкости (рис. 4).

Stress deconcentration method, which was developed under the supervision of A.V. Silvastrov [4], corresponds to the idea of regular transitions of power flows creation in adjacent cross sections of CTF of the lowered cold resistance (fig. 4).

Рис. 4. Классификация методов регулирования напряжений и деформаций в металлических конструкциях

Fig. 4. Methods classification of stress and strain control in metal structures

К регулированию полей остаточных технологических напряжений и деформаций в металлических конструкциях привлечено внимание многих отечественных и зарубежных исследователей [11—14, 16—25]. Снижения технологических напряжений добиваются различными мето-

Many Russian and foreign researchers paid attention to regulation of residual stress and strain fields [11—14, 16—25]. Decrease of technological strains is achieved by different methods (general and local heat treatment, plastic deformation of the material, low-frequency vibration treatment,

дами (общей и местной термообработкой, пластическим деформированием материала, низкочастотной виброобработкой, ультразвуковой ударной обработкой и др.). Более многочисленными являются методы регулирования остаточных сварочных напряжений. Эти методы разрабатывались в приложении к сварным металлоконструкциям машиностроения, судостроения, энергетики и других отраслей [11—13, 17—25] и в меньшей мере — для потребностей строительства [16]. Вместе с тем известно, что при охлаждении зоны расплава сварного шва остаточные сварочные напряжения могут достигать 80 % от предела текучести стали [16, 19, 20]. При наложении участков растяжения сварочных полей напряжений и растянутых зон напряжений от расчетной нагрузки в окрестности концентраторов величины суммарных напряжений приближаются к величине временного сопротивления стали и создают условия для зарождения и развития хрупкого излома. В связи с этим очевидна необходимость снижения остаточных напряжений, особенно на стадиях проектирования и изготовления металлоконструкций.

Методы регулирования локальных полей технологических напряжений и деформаций можно разделить на две группы: 1) методы общей обработки конструкции или ее элементов; 2) методы местной обработки. К первой группе можно отнести термообработку отдельных конструктивных форм (например, высокий отпуск [11—13, 19]) и контролируемое предварительное нагружение. Вторая группа объединяет методы, направленные на создание в сварной КТФ остаточных напряжений сжатия в зонах концентраторов посредством упрочняющего наклепа, местного нагрева, точечного или линейного пластического деформирования металла механическими средствами или энергией взрыва [11—13, 18—27]. Предложенные методы не являются универсальными для всех типов сварных швов, соединений и конструктивных форм и име-

ultrasonic impact treatment, etc.). The methods of residual welding stress are more numerous. These methods were developed in addition to welded metal structures of mechanic engineering, ship engineering, energy sector and other branches [11—13, 17—25] and to a lesser extend — for the needs of construction [16]. At the same time it is known, that during cooling of melt zone of weld joint the residual welded stresses can achieve 80 % from yielding point of steel [16, 19, 20]. In case of overlap of the tension areas of welding stress fields and tension areas of stresses from design load in the area of concentrators the values of the combined stresses approach the value of ultimate steel strength and create the conditions for brittle fracture development. That's why the necessity of residual stress decrease is obvious, especially on the stages of metal structures design and production.

The regulation methods of the local fields of technological stress and strain can be divided into two groups: 1) the methods of general processing of a construction or its elements; 2) the methods of local processing. In the first group we can name thermal treatment of separate construction forms (for example, high tempering [11—13, 19]) and the controlled preload. The second group consists of the methods aimed at the creation of residual compressive stresses in a welded construction-technological form in the concentrators' zones using work-harden, local heating, point or linear plastic deforma-

ют различную эффективность снижения остаточных напряжений [11, 18, 19, 27]. Так, высокий отпуск целесообразно применять для отдельных КТФ уникальных зданий и сооружений. При изготовлении, реконструкции достаточно широко применяют методы второй группы [20, 21]. Эффективность методов второй группы можно обеспечить только с использованием расчетного сопровождения, основанного на решении термопластических задач [20, 21].

По данным анализа хрупких разрушений стальных строительных конструкций установлено, что наиболее часто такие разрушения происходят в первые годы эксплуатации [4]. Такой эффект объясняется приспособляемостью дефектных зон конструкций за счет развития в этих областях пластических деформаций и соответствующего изменения полей внутренних напряжений [4, 28]. Поэтому для ряда ответственных конструкций нормативная документация предусматривает пробные испытания нагрузкой, превышающей эксплуатационную [4]. Так как в процессе пробных загрузок в зонах концентраторов, число дефектов напряжения возрастает до величины предела текучести конструкционного металла, то в таких зонах нельзя допускать неконтролируемое развитие пластических деформаций. Визуализацию этих зон и контроль за ходом пластического деформирования при пробном нагружении можно осуществлять с использованием компьютерной термографии [29].

Эффективным способом создания сжимающих остаточных напряжений в зонах сварочных соединений является поверхностный наклеп [19, 26]. Метод поверхностного наклепа может применяться не только для снижения сварочных напряжений, он является проверенным средством повышения работоспособности ответственных резьбовых соединений [30].

tion of metal by mechanical means or explosion energy [11—13, 18—27]. So it is advisable to apply high tempering for separate construction-technological forms of unique buildings and constructions. In the process of production and reconstruction the methods of the second group are widely used [20, 21]. The efficiency of the second group methods can be provided only by using the designed monitoring based on thermoplastic tasks solution [20, 21].

According to brittle fracture analysis of steel building structures it was discovered, that such fractures usually happen in the first years of operation [4]. Such an effect is explained by adaptability of construction defect zones because of plastic deformations development in these zones and the corresponding change of internal stresses fields [4, 28]. That's why the regulatory documents for some responsible constructions suppose testing by the loads exceeding the operational loads [4]. For the reason that during the test loadings in the concentrators zones the quantity of defects increase to the yield point value of the construction material, the uncontrolled development of plastic deformations should be prevented in such zones. The visualization of such zones and control over them can be performed with the use of computer tomography [29].

Surface cold working is an effective method for creating compress residual stresses in weld joints zones [19, 26]. The surface cold working method can be applied not only for reducing weld stresses, it is also a well-tried method to raise the operational capacity of responsible threaded joints [30].

Повысить хладостойкость конструктивных форм, содержащих различные крепления соединительных элементов к кромкам растянутых основных элементов конструкций, можно посредством наложения на поля рабочих напряжений в зонах концентраторов полей сжимающих остаточных напряжений, создаваемых с помощью локального нагрева [21]. На рис. 5 для примера показаны места расположения зон локального нагрева КТФ пониженной хладостойкости типа Б (см. рис. 1). Нагрев зон целесообразно выполнять концентрированными источниками, поля температур от которых должны быть заранее рассчитаны. Температура нагрева поддерживается в пределах 300...350 °С в течение 1...2 мин [18—21]. Технология нагрева должна предусматривать контроль температуры (термокарандашами, с использованием термографии). Использование компьютерной термографии предоставляет возможность не только визуализировать распределение температуры на поверхности, но и управлять полями остаточных напряжений и деформаций в контролируемом элементе.

Рис. 5. Схема расположения зон локального нагрева для создания полей сжимающих напряжений у концентратора КТФПХ типа Б

В нестандартных случаях целесообразно комбинировать методы регулирования полей технологических напряжений [31].

Выводы. 1. Приведена классификация методов повышения хладостойкости стальных конструктивных форм с акцен-

It is possible to increase the cold resistance of constructive forms containing different joints of elements to the edges of tensioned main construction elements by overlapping of compressing residual stresses zones created by local heating on operational stresses fields in concentrators' zones [21]. Fig. 5 shows as an example the areas of local heating of CTF of the lowered cold resistance of the type B (see fig. 1). It is advisable to heat the zones with concentrated sources, temperature fields of which should be previously calculated. The heating temperature is being kept in the range 300...350 °С during 1...2 minutes [18—21]. The heating technology should presuppose the temperature control (by tempersticks with the use of thermography). The use of computer thermography gives the possibility not only to visualize temperature distribution on the surface, but also to control residual stress and strain fields in the element under control.

Fig. 5. The scheme of local heating zones distribution for creating compressing stress fields in the concentrator CTF with increased cold resistance of B type

In non-standard situations it is advisable to combine the methods of technological stresses fields' control [31].

Conclusions: 1. The classification of the methods to raise cold resistance of steel constructions is

тированием внимания на регулировании локальных полей внутренних напряжений и деформаций для предотвращения хрупкого разрушения стальных конструкций.

2. Указана возможность применения компьютерной термографии не только для визуализации температурных полей на поверхности, но и для управления полями остаточных напряжений и деформаций в контролируемом элементе.

Библиографический список

1. СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23—81*. М. : ОАО «ЦПП», 2011. 171 с.

2. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01—87. М. : МПР РФ, 2012. 280 с.

3. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1—10: Material toughness and through-thickness properties. EN 1993-1-10: 2005/AC. 2005. 16 p.

4. Бирюлев В.В., Кошин И.И., Крылов И.И., Сильвестров А.В. Проектирование металлических конструкций. Л. : Стройиздат, 1990. 430 с.

5. Saal H., Steidl G., Volz M. Sprödbuchssicherheit im Stahlbau // Stahlbau. Sept. 2001. Vol. 70. No. 9. Pp. 685—697.

6. Мельников Н.П., Винклер О.Н., Махутов Н.А. Условия и причины хрупких разрушений строительных стальных конструкций // Материалы по металлическим конструкциям. М. : Стройиздат, 1972. Вып. 16. С. 14—27.

7. Ларионов В.П., Кузьмин В.Р., Слепцов О.И. Хладостойкость материалов и элементов конструкций : результаты и перспективы / отв. ред. В.В. Филиппов. Новосибирск : Наука, 2005. 290 с.

8. Махутов Н.А., Лыглаев А.В., Большаков А.М. Хладостойкость (метод инженерной оценки) / отв. ред.

offered with special attention paid to regulation of the local fields of internal stresses and strains in order to prevent brittle fracture of steel structures.

2. The possibility of computer thermography was indicated not only for temperature fields on the surface visualization, but also for controlling the residual stress and strain fields in the controlled element.

References

1. SP 16.13330.2011. *Stal'nye konstrukt-sii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP II-23—81** [Requirements SP 16.13330.2011. Steel Structures. The Updated Edition of SNiP II-23—81*]. Moscow, OAO «TsPP» Publ., 2011, 171 p. (In Russian)

2. SP 70.13330.2012. *Nesushchie i ograzh-dayushchie konstrukt-sii. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 3.03.01—87* [Requirements SP 70.13330.2012. Carrying and Protecting Structures. The Updated Edition of SNiP 3.03.01—87]. Moscow, MRR RF Publ., 2012, 280 p. (In Russian)

3. Eurocode 3: Design of Steel Structures — Part 1—10: Material Toughness and Through-Thickness Properties. EN 1993-1-10: 2005/AC. 2005. 16 p.

4. Biryulev V.V., Koshin I.I., Krylov I.I., Sil'vestrov A.V. *Proektirovanie me-tall-icheskikh konstrukt-siy* [Design of steel structures]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1990, 430 p. (In Russian)

5. Saal H., Steidl G., Volz M. Sprödbuchssicherheit im Stahlbau. Stahlbau. Sept. 2001, vol. 70, no. 9, pp. 685—697. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/stab.200102320>.

6. Mel'nikov N.P., Vinkler O.N., Makhu-tov N.A. *Usloviya i prichiny khrupkikh raz-rusheniy stroitel'nykh stal'nykh konstrukt-siy* [Conditions and Causes of Brittle Fractures of Building Steel Structures]. *Materialy po metal-licheskim konstrukt-siyam* [Proceedings of Metal Structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1972, no. 16, pp. 14—27. (In Russian)

7. Larionov V.P., Kuz'min V.R., Sleptsov O.I. *Khladostoykost' materialov i elementov konstrukt-siy: rezul'taty i perspektivy* [Cold Resistance of Materials and Structures: Results and Prospects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 290 p. (In Russian)

М.П. Лебедев, Ю.Г. Матвиенко. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011. 192 с.

9. Еремеев П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2006. № 2. С. 65—72.

10. Лепихин А.М., Москвичев В.В., Доронин С.В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем // Вычислительные технологии. 2009. Т. 14. № 6. С. 58—70.

11. Окерблом Н.О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций. М. : Машиностроение, 1964. 420 с.

12. Сагалевиц В.М. Методы устранения сварочных деформаций и напряжений. М. : Машиностроение, 1974. 248 с.

13. Подзей А.В., Сулима А.М., Евстигнеев М.И., Серебренников Г.З. Технологические остаточные напряжения / под ред. А.В. Подзея. М. : Машиностроение, 1973. 216 с.

14. Козлов С.В. Управление остаточными напряжениями в стальных конструкциях с использованием плазменной сварки // Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського. Киев : Сталь, 2008. Вип. 2. С. 13—17.

15. Абовский Н.П., Енджиевский Л.В., Савченков В.И., Деруга А.П., Гитц Н.М. Регулирование. Синтез. Оптимизация. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости / под общ. ред. Н.П. Абовского. М. : Стройиздат, 1978. 189 с.

16. Холл У. Дж., Кихара Х., Зут В., Уэллс А.А. Хрупкие разрушения сварных конструкций / пер. с англ. М.Б. Гутермана. М. : Машиностроение, 1974. 320 с.

8. Makhutov N.A., Lyglaev A.V., Bol'shakov A.M. *Khladostoykost' (metod inzhenernoy otsenki)* [Cold Resistance (Method of Engineering Evaluation)]. SO RAN Publ., 2011, 192 p. (In Russian)

9. Eremeev P.G. Predotvrashchenie lavi-noobraznogo (progressiruyushchego) obrusheniya nesushchikh konstruktsiy unikal'nykh bol'sheproletnykh sooruzheniy pri avariynnykh vozdeystviyakh [Prevention of Avalanche (Progressive) Collapse of Bearing Structures of Unique Span Structures under Emergency Influences]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Construction Mechanics and Calculation of Structures]. 2006, no. 2, pp. 65—72. (In Russian)

10. Lepikhin A.M., Moskvichev V.V., Doronin S.V. Nadezhnost', zhivuchest' i bezopasnost' slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Reliability, Survivability and Safety of Complex Technical Systems]. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies]. 2009, vol. 14, no. 6, pp. 58—70. (In Russian)

11. Okerblom N.O. *Konstruktivno-tekhnologicheskoe проектирование сварных конструкций* [Constructive and Technological Design of Welded Structures]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964, 420 p. (In Russian)

12. Sagalevich V.M. *Metody ustraneniya svarochnykh deformatsiy i napryazheniy* [Residual stresses and methods of regulation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 248 p. (In Russian)

13. Podzey A.V., Sulima A.M., Evstigneev M.I., Serebrennikov G.Z. *Tekhnologicheskije ostatochnye napryazheniya* [Technological Residual Stresses]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 216 p. (In Russian)

14. Kozlov S.V. Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v stal'nykh konstruktsiyakh s ispol'zovaniem plazmennoy svarki [Control of Residual Stresses in Steel Structures Using Plasma Welding]. *Zbirnik naukovikh prats' Ukrain's'kogo naukovo-doslidnogo ta proektnogo institutu stalevikh konstruktsiy imeni V.M. Shimanov's'kogo* [Collection of Scientific Works of the Ukrainian Scientific-Research and Design Institute of Steel Construction named after V.N Shimanovsky]. Kiev, Stal' Publ., 2008, vol. 2, pp. 13—17. (In Russian)

15. Abovskiy N.P., Endzhievskiy L.V., Savchenkov V.I., Deruga A.P., Gits N.M.

17. Копельман Л.А. Влияние остаточных напряжений на склонность сварных элементов к хрупким разрушениям // Сварочное производство. 1963. № 4. С. 9—18.
18. Кудрявцев П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. М. : Машиностроение, 1964. 96 с.
19. Трочун И.П. Внутренние усилия и деформации при сварке. М. : Машгиз, 1964. 248 с.
20. Васылев В.Н., Дозоренко Ю.И. Изготовление конструкции перфорированных балок с гарантированной эпюрой внутренних напряжений в условиях заводов металлоконструкций // Металлические конструкции. 2013. Т. 19. № 1. С. 49—58.
21. Голоднов А.И. Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках. Киев : Сталь, 2008. 150 с.
22. Alpsten G.A., Tall D.L. Residual Stresses in Heavy Welded Shapes. Geometry of plates and shapes is an important variable affecting residual Stress magnitude and distribution, and initial residual stresses due to rolling can be a higher magnitude than those due to welding // Welding Research Supplement. March. 1970. Pp. 93—105.
23. Siddique M., Abid M., Junejo H.F., Mufti R.A. 3-D finite element simulation of welding residual stresses in pipe-flange joints: effect of welding parameters // Materials Science Forum. 2005. Vol. 490—491. Pp. 79—84.
24. Wilson W.M., Chao Chien Hao. Residual stresses in welded structures // University of Illinois Bulletin. February 2. 1946. Vol. 43. No. 40. 80 p.
25. DeLong D.T., Bowman M.D. Fatigue Strength of Steel Bridge Members with Intersecting Welds. Final Report FHWA/IN/JTRP-2009/19. Design 7/10 JTRP-2009/19 INDOT Division of Research West Lafayette, IN 47906 // Indianapolis, July 2010. 204 p.
- Regulirovanie. Sintez. Optimizatsiya. Izbrannyye zadachi po stroitel'noy mekhanike i teorii uprugosti* [Regulation. Synthesis. Optimization. Selected Problems of Structural Mechanics and Theory of Elasticity]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 189 p. (In Russian)
16. Hall U.J., Kichara H., Zut V., Wells A.A. *Khrupkie razrusheniya svarnykh konstruktсий* [Brittle Fracture of Welded Structures]. Russian translation. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974, 320 p. (In Russian)
17. Kopel'man L.A. Vliyanie ostatochnykh napryazheniy na sklonnost' svarnykh elementov k khrupkim razrusheniyam [Influence of Residual Stresses on the Tendency of Welded Elements to Brittle Fracture]. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding Production]. 1963, no. 4, pp. 9—18. (In Russian)
18. Kudryavtsev P.I. *Ostatochnye svarochnye napryazheniya i prochnost' soedineniy* [Residual Welding Stresses and Strength of Joints]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964, 96 p. (In Russian)
19. Trochun I.P. *Vnutrennie usiliya i deformatsii pri svarke* [Internal Forces And Deformations At Welding]. Moscow, Mashgiz Publ., 1964, 248 p. (In Russian)
20. Vasylev V.N., Dozorenko Yu.I. Izgotovlenie konstruktсий perforirovannykh balok s garantirovannoy epyuroy vnutrennikh napryazheniy v usloviyakh zavodov metallokonstruktсий [Design of Perforated Beams with Guaranteed Diagrams of Internal Stresses in Metal Plants]. *Metallicheskie konstruktсии* [Metal Structures]. 2013, vol. 19, no. 1, pp. 49—58. (In Russian)
21. Golodnov A.I. *Regulirovanie ostatochnykh napryazheniy v svarnykh dvutavrovykh kolonnakh i balkakh* [Regulation of Residual Stresses in Welded I-beam Columns and Beams]. Kiev, Stal' Publ., 2008, 150 p. (In Russian)
22. Alpsten G.A., Tall D.L. Residual Stresses in Heavy Welded Shapes. Geometry of Plates and Shapes is an Important Variable Affecting Residual Stress Magnitude and Distribution, and Initial Residual Stresses Due to Rolling Can be a Higher Magnitude Than Those Due to Welding. Welding Research Supplement. March, 1970, pp. 93—105.

26. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. М. : Машиностроение, 1985. 152 с.

27. Винокуров В.А. Отпуск сварных конструкции для снижения напряжений. М. : Машиностроение, 1973. 215 с.

28. Алявдин П.В. Пределный анализ конструкций при повторных нагружениях. Минск : УП «Технопринт», 2005. 284 с.

29. Иванов А.М., Лукин Е.С., Ларионов В.Н. К исследованию кинетики упругопластического деформирования и разрушения элементов конструкций с концентраторами напряжений по тепловому излучению // Доклады Академии наук. 2004. Т. 395. № 5. С. 609—613.

30. Якушев А.И., Мустаев Р.Х., Мавлютов Р.Р. Повышение прочности и надежности резьбовых соединений. М. : Машиностроение, 1979. 215 с.

31. Иванов А.М., Лукин Е.С. Комбинирование методов обработки — эффективный способ управления ударной вязкостью сталей // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 4 (5). С. 1239—1242.

*Поступила в редакцию
в январе 2015 г.*

Об авторе: **Мойсейчик Евгений Алексеевич** — кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры металлических и деревянных конструкций, **Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (ФГБОУ ВПО «НГАСУ» (Сибстрин))**, 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, д. 113, emoisseitchik@mail.ru.

23. Siddique M., Abid M., Junejo H.F., Mufti R.A. 3-D Finite Element Simulation of Welding Residual Stresses in Pipe-Flange Joints: Effect of Welding Parameters. Materials Science Forum. 2005, vol. 490—491, pp. 79—84. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.490-491.79>.

24. Wilson W.M., Chao Chien Hao. Residual Stresses in Welded Structures. University of Illinois Bulletin. February 2. 1946, vol. 43, no. 40, 80 p.

25. DeLong D.T., Bowman M.D. Fatigue Strength of Steel Bridge Members with Intersecting Welds. Final Report FHWA/IN/JTRP-2009/19. Design 7/10 JTRP-2009/19 INDOT Division of Research West Lafayette, IN 47906 // Indianapolis, July 2010, 204 p.

26. Rykovskiy B.P., Smirnov V.A., Shchetin G.M. *Mestnoe uprochnenie detaley poverkhnostnym naklepom* [Local Hardening Of Details By Surface Hardening]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 152 p. (In Russian)

27. Vinokurov V.A. *Otpusk svarnykh konstruksii dlya snizheniya napryazheniy* [Draw of Welded Structures to Reduce Stresses]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 215 p. (In Russian)

28. Alyavdin P.V. *Predel'nyy analiz konstruksiy pri povtornykh nagruzheniyakh* [Limit Analysis of Structures under Repeated Loading]. Minsk, UP «Tekhnoprint» Publ., 2005, 284 p. (In Russian)

29. Ivanov A.M., Lukin E.S., Larionov V.N. K issledovaniyu kinetiki uprugoplasticheskogo deformirovaniya i razrusheniya elementov konstruksiy s kontsentratorami napryazheniy po teplovomu izlucheniyu [On the Kinetics Study of Elastic-Plastic Deformation and Fracture of Structural Elements with Stress Concentrators on Thermal Radiation]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of the Russian Academy of Sciences]. 2004, vol. 395, no. 5, pp. 609—613. (In Russian)

30. Yakushev A.I., Mustaev R.Kh., Mavlyutov R.R. *Povyshenie prochnosti i nadezhnosti rez'bovykh soedineniy* [Increasing the Strength and Reliability of Threaded Connections]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979, 215 p. (In Russian)

31. Ivanov A.M., Lukin E.S. Kombinirovaniye metodov obrabotki — effektivnyy sposob upravleniya udarnoy vyazkost'yu staley [Combining the Treatment Methods — An Effective Way to Control the Toughness of Steel]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings

Для цитирования: *Мойсейчик Е.А.* Предотвращение хрупкого разрушения стальных конструкций регулированием локальных полей напряжений и деформаций // Вестник МГСУ. 2015. № 2. С. 45—59.

of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2012, vol. 14, no. 4 (5), pp. 1239—1242. (In Russian)

Received in January 2015.

About the author: **Moyseychik Evgeniy Alekseevich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral Student, Department of Metal and Wooden Structures, **Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (NSUACE (Sibstrin))**, 113 Leningradskaya str., Novosibirsk, 630008, Russian Federation; emoisseitchik@mail.ru.

For citation: *Moyseychik E.A.* Predotvrashchenie khrupkogo razrusheniya stal'nykh konstruktsiy regulirovaniem lokal'nykh poley napryazheniy i deformatsiy [Prevention of Brittle Fracture of Steel Structures by Controlling the Local Stress And Strain Fields]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015, no. 2, pp. 45—59. (In Russian)