

**Анализ причин разрушения металлических конструкций опорного узла стрелового крана\*****В. Ф. Лукьянов, С. С. Ассауленко**

*Проведен анализ причин разрушения грузоподъемного крана Gottwald HMK 170 EG (63 т), которое произошло в 2011 году на территории ОАО «Новороссийский морской торговый порт». Разработаны конструктивные и технологические рекомендации восстановления несущей способности платформы. Эти предложения основаны на результатах анализа повреждений сварных соединений поворотной платформы грузоподъемного крана и численном трехмерном моделировании ее напряженного состояния. Показано, что резкое изменение податливости сварного узла в районе расположения ребер жесткости, подкрепляющих опорную плиту платформы, обуславливает локальное повышение напряжений и создает предпосылки к зарождению усталостных трещин. Результаты моделирования участков зарождения трещин качественно совпадают с результатами обследования крана. Показано, что локализация напряжений в сварных соединениях узлов с неоднородной податливостью соединяемых деталей является общей закономерностью. Это необходимо учитывать как при проектировании, так и при разработке технологии ремонта. На конкретном примере предложено при ремонте сварного узла установить дополнительные накладки, обеспечивающие плавное изменение податливости сварного узла в месте расположения ребра жесткости платформы.*

**Ключевые слова:** *напряженно-деформированное состояние протяженных угловых швов, 3D-моделирование, метод конечных элементов, явление упругой податливости.*

**Введение.** В последние годы заметно увеличился износ основных производственных фондов во многих ключевых отраслях экономики России: транспортной, топливно-энергетической, аграрно-промышленной, нефтегазодобывающей и др.

Парк грузоподъемных машин в стране сильно изношен. В [1] приведены следующие данные: из 241 903 грузоподъемных кранов 161 778 (т. е. 66,9 %) отработали нормативный срок службы. Таким образом, две трети грузоподъемных кранов требуют замены. Но в большинстве случаев это невозможно из-за высокой стоимости новых машин. Эксплуатация изношенной техники приводит к увеличению числа аварий, к длительным простоям оборудования. Кроме того, растет объем работ по ремонту и восстановлению деталей с применением сварочных технологий.

Для минимизации числа аварий и несчастных случаев при эксплуатации грузоподъемных кранов требуется своевременная диагностика, оценка остаточного ресурса и ремонт.

**Конструкция стреловых кранов.** Схема поворотного крана, у которого стрела или башенно-стреловое оборудование закреплены на поворотной платформе, размещенной непосредственно на ходовом устройстве, показана на рис. 1, а [2]. Поворотная платформа опирается через подшипник на кольцо, закрепленное с помощью сварных швов на раме платформы крана (рис. 1, б). В процессе работы стрела поворачивается вокруг вертикальной оси и за счет изгибающего момента создает в шве напряжения, изменяющиеся по величине в зависимости от положения груза в пространстве.

Как показывают результаты обследования долго эксплуатировавшихся кранов, действие переменных нагрузок вызывает появление трещин в сварных швах и приводит к разрушению опорного узла в месте крепления к платформе.

Пример такого разрушения — авария грузоподъемного крана Gottwald HMK 170 EG (63 т), которая произошла 24 декабря 2011 года на территории ОАО «Новороссийский морской торговый порт» в Новороссийске.

\* Работа выполнена по заказу ООО ИКЦ «Мысль» НГТУ (договор № 89-12Н от 27.01.2012 г.).

Для оценки остаточного ресурса подобных конструкций и разработки технологии их ремонта необходимо провести анализ напряженного состояния критических участков сварного соединения и установить места локализации разрушения.

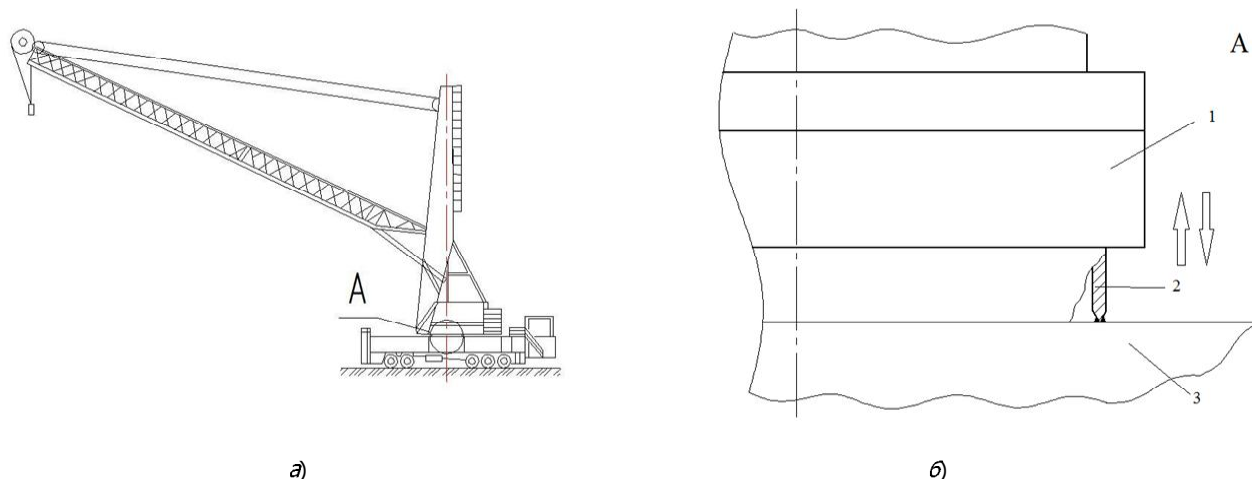


Рис. 1. Схема конструкции стрелового крана: общий вид (а); опорно-поворотный узел (б); 1 — поворотное устройство грузоподъемного крана, 2 — обечайка опорно-поворотного устройства, 3 — верхний лист рамы крана

**Цель данной работы** состоит в том, чтобы на основании моделирования напряженного состояния рамы и опорного узла стрелового крана провести анализ причин разрушения металлических конструкций и установить закономерности локализации напряжений.

**Результаты моделирования напряженного состояния рамы и опорного узла стрелового крана.** Мобильный кран *НМК 170 EG* выбран для анализа по двум причинам. Во-первых, это часто используемая конструкция стреловых поворотных кранов. Во-вторых, в 2011 году на территории ОАО «Новороссийский морской торговый порт» произошла авария аналогичного крана, что позволяет провести качественное сравнение результатов расчета.

В ходе технической экспертизы выявлена причина разрушения узла крепления опорно-поворотного устройства к мобильной платформе. Авария произошла из-за усталостных трещин в зоне перехода от шва к основному металлу в тавровом соединении места крепления обечайки к верхнему листу рамы платформы [3]. Трещина шла по всей окружности вдоль сварного шва узла крепления опорно-поворотного устройства (ОПУ) к верхнему листу мобильной платформы.

При осмотре места аварии на разрушенных частях крана и на отобранных образцах имеются места наклепа, что свидетельствует о знакопеременном характере воздействия нагрузки на кромки трещины в процессе длительной эксплуатации.

**3D-моделирование напряженного состояния опорно-поворотного устройства крана с учетом его конструктивных особенностей.** Для создания модели крана использовалась конструкторская документация, предоставленная ОАО «Новороссийский морской торговый порт». При моделировании использовался программный комплекс «Компас 3D» с последующим расчетом напряженного состояния с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Модель соединения опорного узла и рамы крана показана на рис. 2.

Для расчетов напряженного состояния использовалась система конечноэлементного моделирования *ANSYS* [4].

3D-модель была импортирована в среду *ANSYS Workbench* и разбита на конечные элементы (рис. 3). К модели были приложены узлы закрепления и нагрузки, соответствующие частному случаю реальных нагрузок при работе грузоподъемного крана [4]. Груз, прикрепленный к стреле (рис. 1, а),

вызывает появление изгибающего момента. В результате на шов, соединяющий стенку опорного кольца с платформой, действуют силы в вертикальном направлении.

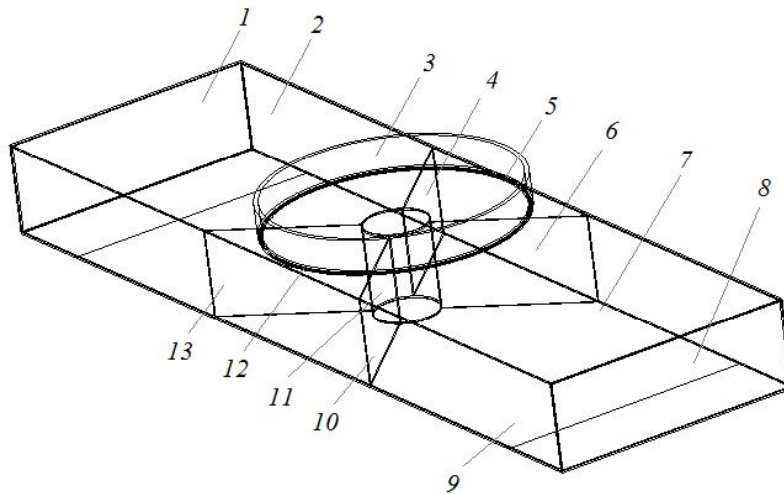


Рис. 2. 3D-модель соединения опорного узла и рамы. 1 — задняя стенка рамы, 2 — правая боковая стенка рамы, 3 — обечайка ОПУ, 4 — усилитель 45°, 5 — внутренний сварной шов, 6 — усилитель 315°, 7 — нижнее основание рамы, 8 — фронтальная стенка рамы, 9 — левая боковая стенка рамы, 10 — усилитель 225°, 11 — усиливающий цилиндр, 12 — наружный сварной шов, 13 — усилитель 135°

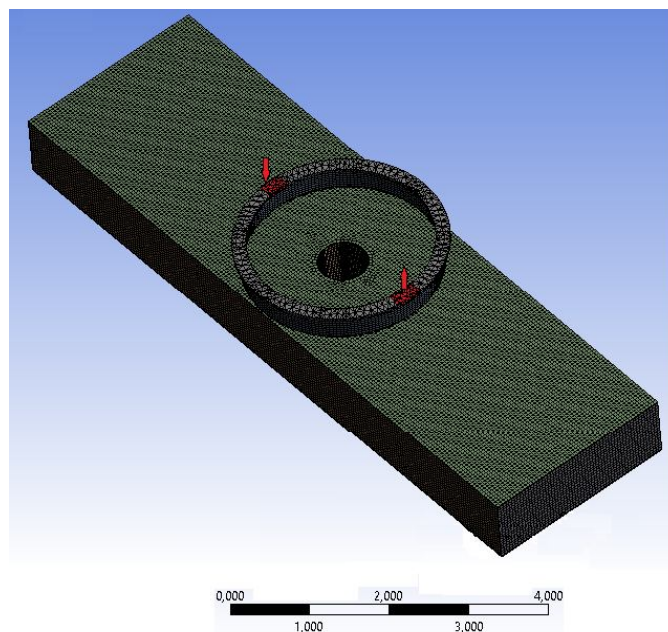


Рис. 3. Разбиение модели на конечные элементы с указанием нагрузки

Очевидно, что величина действующих сил распределяется неравномерно вдоль шва. Кроме того, при повороте стрелы крана величина и направление действия сил могут изменяться. Это способствует накоплению повреждений на различных участках сварного соединения.

Результаты моделирования напряженного состояния в узле сочленения опорного узла и платформы показали наличие четырех явно выраженных зон локализации напряжений вдоль шва (рис. 4). Можно предположить, что их появление связано с поворотом стрелы крана, но более детальный анализ позволил выявить более важную причину локализации напряжений на этих участках конструкции платформы.

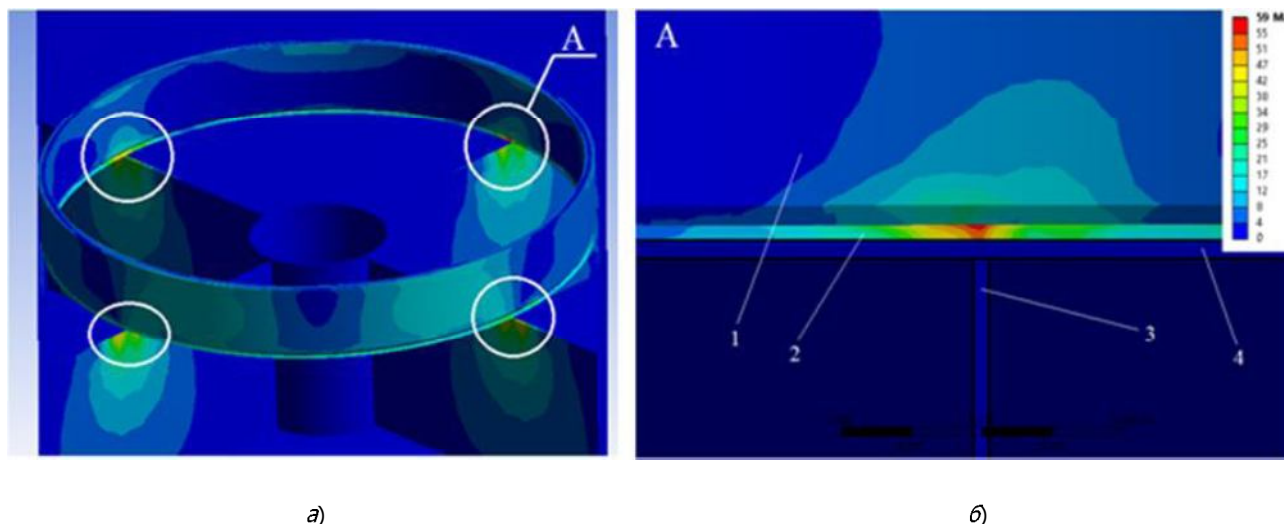


Рис. 4. Расчет напряженно-деформированного состояния: распределение зон локализации напряжений вдоль сварного шва (эквивалент напряжения по фон Мизесу) (а); зона пересечения ребра и опорного кольца (б). 1 — обечайка опорно-поворотного устройства, 2 — сварной шов, 3 — ребро жесткости, 4 — верхний лист рамы

На рис. 4, а видно, что зоны локализации напряжений совпадают с расположением ребер жесткости под опорной плитой (если смотреть сверху под углами  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  и  $315^\circ$ ), которые ограничивают упругую податливость листа платформы. В результате участки шва, расположенные в зоне пересечения ребра и опорного кольца, воспринимают большую нагрузку, а соседние участки оказываются разгруженными. На рис. 4, б наглядно представлена картина распределения напряжений в стенке обечайки опорно-поворотного устройства 1 на участке сопряжения с ребром 3 поворотной платформы. Наибольшая величина напряжений наблюдается в сварном шве 2 в районе пересечения обечайки и ребра жесткости. По мере удаления от зоны пересечения в сварном шве отмечается резкое снижение напряжений. Можно предположить, что такой характер распределения напряжений связан с увеличением жесткости узла сопряжения в районе расположения ребра. По мере удаления от ребра жесткость опорной плиты уменьшается, что способствует уменьшению усилий, передаваемых через шов.

Влияние неодинаковой жесткости соединяемых элементов на распределение напряжений подробно исследовано в работах [5–7] и используется в расчетах прочности сварных соединений ферм из полых стержневых элементов. Например, Еврокод 3 [8] рекомендует для компенсации неравномерного распределения нагрузки вдоль сварного соединения принимать в расчет уменьшенную длину шва (вводить корректирующий коэффициент), учитывая возможность того, что только часть длины сварного шва может эффективно воспринимать нагрузку.

Наличие зон с повышенным уровнем напряжений подтверждается результатами анализа разрушения стрелового мобильного крана *НМК 170 EG*. Трещины были обнаружены в местах подкрепления опорного листа рамы ребрами жесткости, а именно — при виде сверху под углами  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  и  $315^\circ$ . Моделирование дало такие же результаты (рис. 4, а).

**Выявление концентраторов напряжений в сечении опорно-поворотного узла.** Появлению усталостных трещин способствовала локализация напряжений, обусловленных неодинаковой жесткостью конструкции вдоль сварного соединения. Кроме того, сыграла роль неблагоприятная геометрия профиля сварного шва таврового соединения опорного кольца с платформой (рис. 5, а). Толщина опорного кольца в зоне перехода от шва к основному металлу имеет несоизмеримое утонение, и эта зона фактически является треугольным надрезом, что создает высокую концентрацию напряжений, способствующую возникновению усталостных трещин. Результаты расчетов (рис. 5, б) подтверждают высокий уровень напряжений в этой зоне.

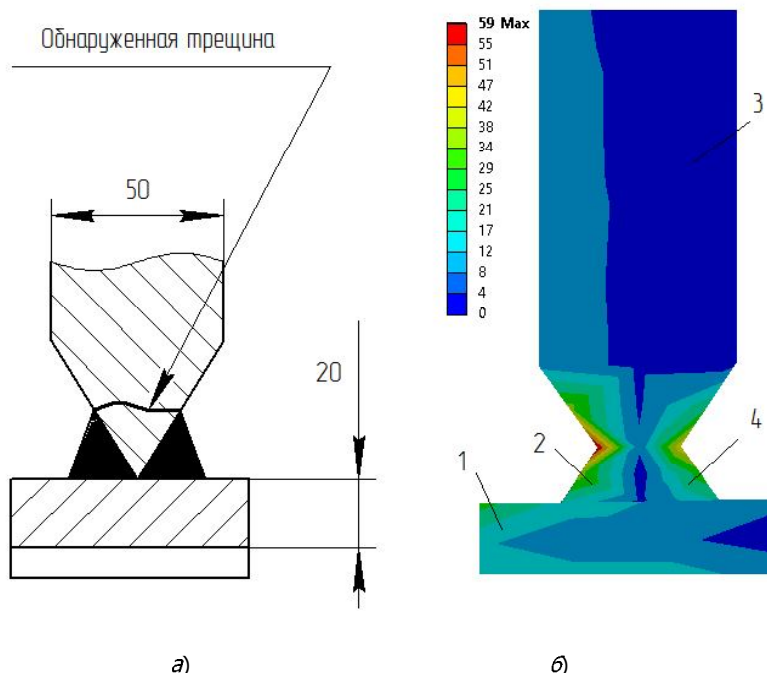


Рис. 5. Результаты анализа обследования зоны перехода в сечении опорно-поворотного узла грузоподъемного крана: схема (а); напряжения по фон Мизесу (б). 1 — верхний лист рамы, 2 — наружный шов, 3 — обечайка ОПУ, 4 — внутренний шов

**Заключение.** Особенности напряженного состояния конструкций подробно исследованы в работах [9–12]. Предложены различные способы по снижению локальных напряжений в зонах их концентрации.

1. Наибольшая концентрация напряжений возникает в зоне перехода от основного металла к металлу сварного шва. Это обусловлено несовершенством конструктивного оформления таврового соединения. Для увеличения долговечности соединения и остаточного ресурса рекомендуется вдоль сварного шва произвести наплавку металла с целью увеличения толщины сечения и обеспечения плавного перехода от шва к основному металлу.

2. В зонах расположения ребер жесткости имеет место локальное повышение напряжений, обусловленное неравномерным распределением податливости соединяемых элементов вдоль шва. Именно на этих участках рекомендуется устанавливать подкрепляющие планки при ремонте поврежденной конструкции.

3. Рекомендуется при ремонте сварного узла установить дополнительные накладки, обеспечивающие плавное изменение податливости сварного узла в месте расположения ребра жесткости платформы.

**Библиографический список**

1. Годовой отчет о деятельности федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2011 году / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору; Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности. — Москва, 2012. — 536 с.
2. Справочник по кранам : в 2 т. / В. И. Брауде [и др.]. — Ленинград : Машиностроение, 1988. — Т. 1. — 536 с.
3. Заключение № РНС-33-0138-ГПМ-12 технической экспертизы по вопросам о причинах и характере разрушения портового мобильного крана НМК 170 EG, зав. № 12818900, рег. № 511023, инв. № 93 при аварии, произошедшей 24.12.2011 на территории ОАО «Новороссийский морской торговый порт», сформулированных в письме № 2441-45 от 27.01.2012 ОАО «Новороссийский морской торговый порт» и письме № 538/08-07 от 06.02.2012 Северо-Кавказского управления Ростехнадзора / ООО «ИКЦ «Мысль»» Новочеркасского ГТУ. — Новочеркасск, 2012. — 15 с.
4. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров : справ. пособ. / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. — Санкт-Петербург : Питер, 2004. — 512 с.
5. Лукьянов, В. Ф. Влияние неодинаковой податливости сварных швов на напряженно-деформированное состояние в нахлесточном соединении / В. Ф. Лукьянов, Д. В. Рогозин, В. В. Михайлов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 1999. — № 1. — С. 48–51.
6. Лукьянов, В. Ф. Влияние упругой податливости соединяемых элементов на распределение усилий в прерывистых фланговых швах / В. Ф. Лукьянов, Д. В. Рогозин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 1999. — № 3. — С. 28–35.
7. Людмирский, Ю. Г. Исследование упругой податливости соединения швеллер — пластина методом конечных элементов / Ю. Г. Людмирский, В. В. Михайлов // Сварка XXI век : сб. статей. — Липецк, 2004 год. — Т. 2. — С. 636–642.
8. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1–8. Расчет соединений : технический кодекс установившейся практики ТКП EN 1993-1-8 / Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. — Минск, 2010. — 133 с.
9. Lukjanov, V. F. Imitative Simulation of Welded Joint Fracture Under Low-Cycle Loading / V. F. Lukjanov, A. S. Korobtsov // Int. J. Pres. Ves. & Piping. — 1991. — № 47. — P. 193–206.
10. Варуха, Е. Н. Остаточный ресурс металла труб и сварных соединений газопровода, проработавшего 37 лет / Е. Н. Варуха, В. И. Брюшко // Сварка в Сибири. — 2004. — № 2. — С. 70–73.
11. Лукьянов, В. Ф. Технологическая наследственность как фактор надежности сварных соединений / В. Ф. Лукьянов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2005. — Т. 5, № 3. — С. 13–18.
12. Дюргеров, Н. Г. Ремонт методом дополнительных деталей. Практика ремонта, восстановления и модернизации / Н. Г. Дюргеров, А. П. Павлов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. — 2007. — № 1. — С. 19–21.

Материал поступил в редакцию 23.10.2014.

**References**

1. Godovoy otchet o deyatel'nosti federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2011 godu. [Annual report on the activities of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision in 2011.] Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru; Nauchno-tekhnicheskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti. [Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision; Scientific and Technical Research Center of Industrial Safety.] Moscow, 2012, 536 p. (in Russian).

2. Braude, V. I. Spravochnik po kranam : v 2 t. [Handbook of cranes in 2 volumes.] Leningrad : Mashinostroenie, 1988, vol. 1, 536 p. (in Russian).
3. Zaklyuchenie № RNS-33-0138-GPM-12 tekhnicheskoy ekspertizy po voprosam o prichinakh i kharaktere razrusheniya portovogo mobil'nogo kрана NMK 170 EG, zav. № 12818900, reg. № 511023, inv. № 93 pri avarii, proizoshedshey 24.12.2011 na territorii OAO «Novorossiyskiy morskoy trgovyy port», sformulirovannykh v pis'me № 2441-45 ot 27.01.2012 OAO «Novorossiyskiy morskoy trgovyy port» i pis'me № 538/08-07 ot 06.02.2012 Severo-Kavkazskogo upravleniya Rostekhnadzora. [Technical expertise conclusion no. RNS-33-0138-GPM-12 on the causes and nature of the destruction of the port mobile crane NMK 170 EG, serial no. 12818900, reg. no. 511023, tag no. 93, at the accident which happened on the territory of JSC "Novorossiysk Commercial Sea Port", contained in the letter no. 2441-45 of 27.01.2012, JSC "Novorossiysk Commercial Sea Port", and in the letter no. 538 / 08-07 of 06.02.2012, North –Caucasian Rostekhnadzor management.] Engineering Consultation Center "Mysl" LLC, NSTU, Novocherkassk, 2012, 15 p. (in Russian).
4. Chigarev, A. V., Kravchuk, A. S., Smalyuk, A. F. ANSYS dlya inzhenerov : sprav. posob. [ANSYS for engineers: reference book.] Sankt-Peterburg : Piter, 2004, 512 p. (in Russian).
5. Lukyanov, V. F., Rogozin, D. V., Mikhaylov, V. V. Vliyanie neodnakovoy podatlivosti svarnykh shvov na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie v nakhlestochnom soedinenii. [Effect of uneven compliance of welds on the stress-strain state in the overlap joint.] Vestnik of DSTU, 1999, no. 1, pp. 48–51 (in Russian).
6. Lukyanov, V. F., Rogozin, D. V. Vliyanie uprugoy podatlivosti soedinyayemykh elementov na raspredelenie usiliy v preryvistykh flangovykh shvakh. [Effect of elastic compliance of connected elements on the distribution of efforts in intermittent flank seams.] Vestnik of DSTU, 1999, no. 3, pp. 28–35 (in Russian).
7. Lyudmirskiy, Y. G., Mikhailov, V. V. Issledovanie uprugoy podatlivosti soedineniya shveller — plastina metodom konechnykh elementov. [Study on elastic compliance of the channel – plate connection by finite element method.] Svarka XXI vek : sb. statey. [Welding XXI century: collected works.] Lipetsk, 2004, vol. 2, pp. 636–642 (in Russian).
8. Evrokod 3. Proektirovanie stal'nykh konstruktsiy. Chast' 1–8. Raschet soedineniy : tekhnicheskii kodeks ustanovivsheysya praktiki TKP EN 1993-1-8. [Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-8. Calculation of connections: technical code of common practice TKP EN 1993-1-8.] Ministry of Architecture and Construction of Belarus. Minsk, 2010, 133 p. (in Russian).
9. Lukjanov, V. F., Korobtsov, A. S. Imitative Simulation of Welded Joint Fracture Under Low-Cycle Loading. Int. J. Pres. Ves. & Piping, 1991, vol. 47, no. 2, pp. 193–206.
10. Varukha, E. N., Bryushko, V. I. Ostatochnyy resurs metalla trub i svarnykh soedineniy gazoprovoda, prorabotavshego 37 let. [Residual life of metal pipes and welded joints of the pipeline that has worked for 37 years.] Svarka v Sibiri, 2004, no. 2, pp. 70–73 (in Russian).
11. Lukyanov, V. F. Tekhnologicheskaya nasledstvennost' kak faktor nadezhnosti svarnykh soedineniy. [Technological heredity as a factor of welded joints reliability.] Vestnik of DSTU, 2005, vol. 5, no. 3, pp. 13–18 (in Russian).
12. Dyurgerov, N. G., Lukyanov, V. F., Pavlov, A. P. Remont metodom dopolnitel'nykh detaley. Praktika remonta, vosstanovleniya i modernizatsii. [Repair by method of optional parts. Practice of repair, restoration, and modernization.] Repair, Reconditioning, Modernization. 2007, no. 1, pp. 19–21 (in Russian).

## FAILURE ANALYSIS OF BOOM SEAT METAL STRUCTURES\*

V. F. Lukyanov, S. S. Assaulenko

*The causes of the destruction of the crane Gottwald HMK 170 EG (63 t) which happened in 2011 on the territory of "Novorossiysk Commercial Sea Port" are analyzed. The structural and engineering recommendations on the platform bearing capacity restoration are developed. These proposals are based on the failure analysis of the weld joints of the prow rotating platform, and on the 3D numerical simulation of its stress state. It is shown that an abrupt change in the welded assembly compliance in the area of the stiffening ribs supporting the platform bedplate causes a local increase in stress and predetermines the fatigue-crack nucleation. The results of the crack nucleation regions simulation are in good agreement with the crane diagnostic results. It is shown that the stress localization in the welded node joints with non-uniform compliance of the connected components is a common pattern. It must be taken into account in both the designing and the development of the repair technique. A specific case suggests extra pads to provide a smooth change in the welded assembly compliance in the area of the platform stiffening rib under the weld assembly repair.*

**Keywords:** stress-strain state of extended fillet welds, 3D simulation, finite element method, elastic compliance effect.

---

\* The research is done on demand of NSTU Engineering Consultation Center "Mysl" LLC, as per contract no. 89-12H of 27.01.2012.