



УДК 69.04

DOI: 10.22227/2949-1622.2025.2.58-67

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

Напряженно-деформированное состояние подкрановых конструкций, получивших повреждения при эксплуатации

Н.А. Бузало*, А.А. Филилеев, А.А. Сильванович

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация

* buzalo_n@mail.ru

Ключевые слова: подкрановые конструкции, усталостные трещины, механические и коррозионные повреждения, моделирование тонкостенных профилей с использованием САЕ-пакетов

История статьи

Поступила в редакцию: 28.04.2025

Доработана: 15.05.2025

Принята к публикации: 17.05.2025

Для цитирования

Бузало Н.А., Филилеев А.А., Сильванович А.А. Напряженно-деформированное состояние подкрановых конструкций, получивших повреждения при эксплуатации // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 10. № 2. С. 58–67.

Аннотация. Подкрановые конструкции при эксплуатации испытывают разнонаправленные воздействия — перемещение крана вдоль кранового пути, торможение моста крана, направленное вдоль кранового рельса, торможение тележки крана, направленное перпендикулярно крановому рельсу. При этом возникают знакопеременные напряжения, которые могут вызвать их усталостное разрушение. В элементах подкрановых балках, тормозных конструкциях возникают и постепенно развиваются усталостные трещины, что в результате может привести к полному выходу из строя конструкций. Еще одной причиной наступления предельного состояния подкрановых конструкций могут быть механические повреждения (износ трущихся деталей) и контакт с агрессивной средой (коррозия). Целью работы является изучение влияния внешних и внутренних факторов на напряженно-деформированное состояние подкрановых конструкций, определяющее их надежность. Для этого предлагается развитие эффективных методов расчета подкрановых конструкций, получивших повреждения при эксплуатации наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойств материалов с использованием САЕ-пакетов.

The stress-strain state of crane structures damaged during operation

Nina A. Buzalo*, Alexey A. Filileev, Andrey A. Silvanovich

M.I. Platov South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

* buzalo_n@mail.ru

Бузало Нина Александровна, к.т.н., профессор, профессор кафедры «Градостроительство, проектирование зданий и сооружений», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; Scopus: 57190964121, ORCID: 0000-0002-6204-0214; E-mail: buzalo_n@mail.ru

Филилеев Алексей Александрович, аспирант кафедры «Градостроительство, проектирование зданий и сооружений», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; E-mail: Fil08@bk.ru

Сильванович Андрей Алексеевич, аспирант кафедры «Градостроительство, проектирование зданий и сооружений», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, д. 132; E-mail: andrey.sily@gmail.com

© Бузало Н.А., Филилеев А.А., Сильванович А.А., 2025



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: crane structures, fatigue cracks, mechanical and corrosion damage, modeling thin-walled profiles using CAE-packages

Article history

Received: 28.04.2025

Revised: 15.05.2025

Accepted: 17.05.2025

For citation

Buzalo N.A., Filileev A.A., Silvanovich A.A. The stress-strain state of crane structures damaged during operation. *Reinforced concrete structures*. 2025; 2(10):58-67.

Abstract. During operation, crane structures are subject to multidirectional impacts: movement of the crane along the crane track, braking of the crane bridge directed along the crane rail, braking of the crane trolley directed perpendicular to the crane rail. This creates alternating stresses that can cause fatigue failure. In the elements of overhead crane beams and brake structures, fatigue cracks appear and gradually develop, which can ultimately lead to the complete failure of the structures. Another reason for the onset of the limit state of crane structures may be mechanical damage (wear of rubbing parts) and contact with an aggressive environment (corrosion). The aim of the work is to establish patterns of failure occurrence, study the influence of external and internal factors on reliability, establish quantitative characteristics and methods for assessing the reliability of crane structures. For this purpose, it is proposed to develop effective methods for calculating crane structures that have been damaged during operation, taking into account the specifics of the impacts on them and the properties of materials using CAE packages.

ВВЕДЕНИЕ

Современные производственные технологические процессы нуждаются в надежных грузоподъемных механизмах большой мощности. Основным видом подъемно-транспортного оборудования на производственных предприятиях являются мостовые опорные и подвесные краны. В зависимости от вида технологического процесса предприятия используются краны различной грузоподъемности и режима работы, что накладывает заметный отпечаток на выбор подкрановых конструкций.

Значительное влияние на эксплуатационную надежность подкрановых конструкций оказывают дефекты и повреждения, которые снижают их остаточный ресурс и могут быть причиной выхода из строя. Степень влияния одного и того же дефекта или повреждения различна и зависит от вида подкрановой конструкции, их напряженно-деформированного состояния, условий работы конструкции.

Анализ технического состояния подкрановых конструкций зданий и сооружений, получивших повреждения, оценка влияния механических и коррозионных повреждений, зафиксированных при обследовании, на возможность их дальнейшей эксплуатации, совершенствование методов интерпретации результатов технического диагностирования на основе компьютерного моделирования является задачей, поставленной в настоящем исследовании.

Подкрановые конструкции, основная функция которых воспринимать и передавать на каркас здания нагрузки от подъемно-транспортного оборудования, являются также элементами каркаса производственного здания и обеспечивают горизонтальную развязку колонн из плоскости рамы, передачу на вертикальные связи по колоннам продольных усилий от тормозных нагрузок, ветровых нагрузок на торцы здания, сейсмических нагрузок, обеспечивают пространственную работу каркаса (рис. 1). Подкрановые конструкции состоят из подкрановых балок или ферм, воспринимающих вертикальные нагрузки от кранов; тормозных балок (ферм), воспринимающих поперечные горизонтальные воздействия; связей, обеспечивающих жесткость и неизменяемость подкрановых конструкций; узлов крепления подкрановых конструкций; крановых рельсов; креплений и упоров.

Nina A. Buzalo, Candidate of Technical Science, Professor, Professor of the Department of Urban Planning, Building and Structure Design, M.I. Platov South Russian State Polytechnic University, 132 Prosvescheniya St., Novochoerkassk, 346428, Russian Federation; Scopus: 57190964121, ORCID: 0000-0002-6204-0214; E-mail: buzalo_n@mail.ru

Alexey A. Filileev, Postgraduate Student, Department of Urban Planning, Building and Structure Design, M.I. Platov South Russian State Polytechnic University, 132 Prosvescheniya St., Novochoerkassk, 346428, Russian Federation; E-mail: Fil08@bk.ru

Andrey A. Silvanovich, postgraduate student at the Department of Urban Planning, Building and Structure Design, M.I. Platov South Russian State Polytechnic University, 132 Prosvescheniya St., Novochoerkassk, 346428, Russian Federation; E-mail: andrey.sily@gmail.com

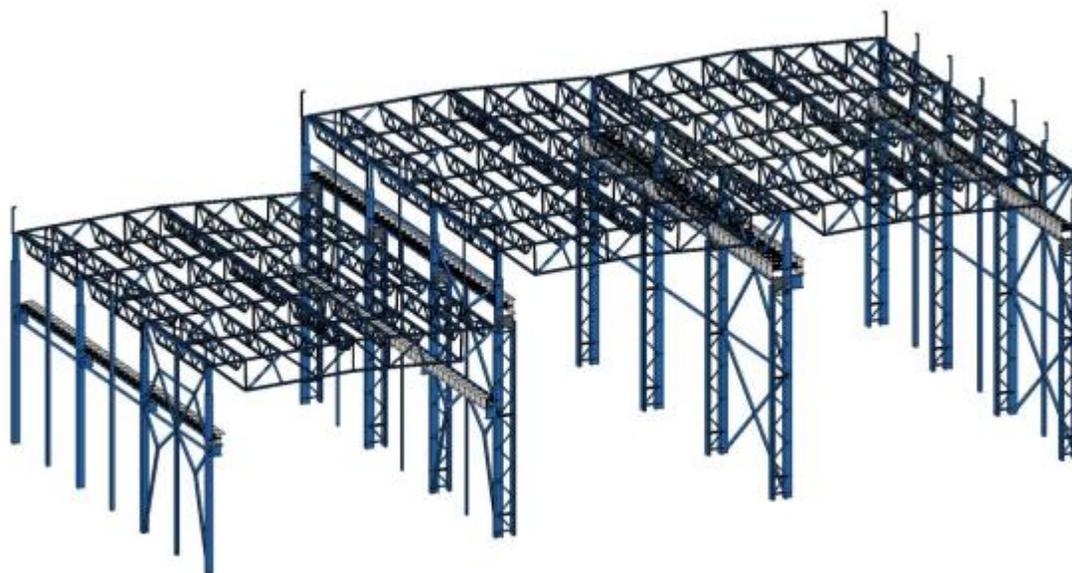


Рис. 1. Модель каркаса производственного здания с мостовыми кранами
Fig. 1. Model of the frame of an industrial building with overhead cranes

Подкрановые балки — конструкции, воспринимающие значительные изгибающие моменты, чаще всего представляют собой массивные сварные двутавры. Крановая нагрузка воспринимается подкрановыми балками, а затем через систему колонна – фундамент передается на основание. Для подкрановых конструкций характерны некоторые особенности, несвойственные другим элементам каркаса производственного здания: высокий уровень напряжений, большие величины вертикальных сосредоточенных крановых нагрузок (до 600–800 кН); значительные горизонтальные поперечные силы; динамический характер вертикальных и боковых воздействий кранов, сопровождающихся рывками и ударами. Следствием этих особенностей являются характерные повреждения подкрановых конструкций: усталостные трещины; расстройство соединений; ослабление узлов.

В соответствии с Федеральным законом от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» к категории опасных производственных объектов относятся объекты, на которых используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы (за исключением лифтов, подъемных платформ для инвалидов), эскалаторы в метрополитенах, канатные дороги, фуникулеры. Следовательно, здания, оборудованные мостовыми и подвесными кранами, относятся к опасным производственным объектам.

Обоснование долговечности и нормальной эксплуатации таких объектов основывается на экспертизе промышленной безопасности. Необходимо проведение большого объема изысканий, связанных с обследованием конструкций, выявлением их фактического состояния, характеристик металла, из которого они выполнены, анализом причин появления имеющихся дефектов и повреждений и оценкой технического состояния основных несущих конструкций поднадзорных сооружений. Повреждения стальных конструкций, появляющиеся и развивающиеся во время их эксплуатации, являются, как правило, следствием грубых нарушений правил технической эксплуатации или ошибок, допущенных при проектировании, дефектов изготовления, транспортирования и монтажа. Во многом наличие повреждений зависит от технического состояния мостового крана и кранового пути. Надо отметить, что на предприятиях, где организован постоянный надлежащий надзор за техническим состоянием мостовых кранов и подкрановых конструкций, они эксплуатируются продолжительное время без проблем, в то же время при отсутствии надлежащего надзора долговечность подкрановых конструкций существенно снижается.

МЕТОДЫ

Целый ряд организаций, таких как ЦНИИСК им. Кучеренко, ЦНИИПСК им. Мельникова, МГСУ, СПбГУПС, многие годы занимаются исследованием состояния подкрановых конструкций в процессе эксплуатации. Результатом исследований является фиксация факта, что независимо от конструктивных решений подкрановых конструкций, применяемых марок стали, вида соединения элементов в них неоднократно обнаруживались усталостные трещины, расстройство соединений, расшатывание узлов, приводящие к нарушению нормальной эксплуатации, ограничению или к остановке производственного процесса. Дефекты и повреждения снижают несущую способность подкрановых конструкций, уменьшают их остаточный ресурс и могут быть причиной их разрушения. Степень опасности одного и того же дефекта или повреждения различна и зависит от вида подкрановой конструкции, напряженно-деформированного состояния, условия работы конструкции. Во многих случаях главной проблемой являются усталостные повреждения, приводящие к необходимости замены рельсов и балок.

Трещины и повреждения возникают наиболее часто в зоне верхнего пояса подкрановых балок (по свидетельству [1] доля этих трещин составляет до 90 % от общего количества повреждений), в местах крепления подкрановых балок и тормозных конструкций к колоннам. В зоне прикрепления опорного ребра к балке трещины появляются вследствие дефектов изготовления опорного ребра и дефектов сварных швов, прикрепляющих ребра к стенке балки. В неразрезных подкрановых балках возможно возникновение трещин в зоне нижнего пояса балки. Локальные разрушения верхних поясных швов составных подкрановых балок и трещины в околошовной зоне стенки, как правило, обнаруживаются в местах стыков крановых рельсов из-за ударного воздействия катка крана, вызванного различным износом концов рельса и ослаблением крепежных элементов рельса. Эксплуатация стальных подкрановых балок с трещинами не допускается нормативными ограничениями Ростехнадзора, что приводит к значительным финансовым потерям, связанным с остановкой производства, выводом поврежденных подкрановых балок из эксплуатации и их заменой или ремонтом [2–4]. Однако опыт обследований эксплуатируемых подкрановых балок показал, что во многих случаях они имеют запасы несущей способности, которые при начальном развитии трещин позволяют временно эксплуатировать поврежденные балки до ремонта или замены [5–7].

Помимо трещин, повреждения подкрановых балок бывают связаны с механическими воздействиями и коррозией металла (рис. 2). Возможно отсутствие и ослабление болтов в опорных ребрах балок; выпучивание опорных ребер в плоскости стенки балки; отсутствие и ослабление болтов крепления балок к колоннам. Недостаточное количество достоверных результатов исследования влияния коррозионных и механических повреждений, усталостных трещин в околошовных зонах стенки, сварных швах на напряженно-деформированные и предельные состояния подкрановых балок не позволяет оценить возможность временной эксплуатации подкрановых балок с повреждениями [8, 9].

В ряде работ [13, 16] предлагается классификация дефектов и повреждений подкрановых конструкций по следующим категориям:

- механические — могут возникнуть по причинам запроектных воздействий на конструкцию. Например, столкновение движущихся частей мостовых кранов с элементами подкрановых конструкций, самостоятельное удаление или добавление элементов и узлов в обход проектной документации (рис. 5, а). В результате подкрановые балки могут получить ослабления в виде вмятин, вырезов, выкусов, уменьшения сечений;



Рис. 2. Механические (а) и коррозионные (b) повреждения подкрановых балок
Fig. 2. Mechanical (a) and corrosion (b) damage to crane beams

- химические — могут быть вызваны воздействием агрессивной среды на элементы не в достаточной степени защищенных стальных подкрановых балок. Особенно часто подобные повреждения встречаются в открытых крановых эстакадах, на предприятиях химической и пищевой промышленности (рис. 5, б);

- конструктивные — связанные с ошибками сборки сварных конструкций на заводе-изготовителе, ошибками в проектной документации, ошибками при монтаже конструкций.

Оценка прочностных характеристик металла эксплуатируемых, подкрановых конструкций при обследовании проводится по рабочим чертежам, данным заводских сертификатов (если они имеются) или по результатам испытаний образцов. Испытания образцов проводят при отсутствии исполнительной документации или сертификатов, а также при недостаточности имеющихся в них сведений или при обнаружении повреждений, которые могли быть вызваны низким качеством металла конструкций и соединений. Для сталей, у которых приведенные в сертификатах или полученные при испытаниях значения предела текучести и временного сопротивления ниже, чем предусмотренные государственными стандартами или техническими условиями на сталь, действовавшими в период строительства, принимаются по минимальным значениям предела текучести, приведенным в сертификатах или полученным при испытаниях [10–12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для продления срока эксплуатации зданий и сооружений, исчерпавших свой нормативный ресурс, появляется необходимость искать резервы несущей способности существующих конструкций [15]. Это требует развития методов определения напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкций для расчета надежности подкрановых балок. Определение НДС элементов конструкции в настоящее время выполняется, как правило, с использованием современных программно-вычислительных комплексов, которые позволяют решать все более сложные задачи, в том числе с учетом физической, геометрической и конструктивной нелинейности. В 2021 г. введен в действие СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла», которым установлены формулировки и требования, регламентирующие информационное моделирование в РФ. Согласно этому документу, создаваемые модели элементов конструкций должны максимально приближаться к реальности: более точно учитывать форму и размеры деталей, жесткость соединений элементов, нелинейную работу материалов и прочие исходные параметры. В то же время чрезмерная детализация расчетной схемы и учет различных типов нелинейности являются неоправданными во многих случаях с

точки зрения затрачиваемых на это ресурсов. Сопряжения элементов друг с другом бывает достаточно описать упрощенно без детализации размеров соединений и их жесткостей.

Моделирование тонкостенных профилей (рис. 3), у которых длина элемента существенно больше размеров сечения ($L \gg b, h$) и в то же время размеры сечения значительно превосходят толщину проката ($b, h \gg s, t$), может выполняться:

- оболочечными конечными элементами (shell). В этом случае каждый узел расчетной сетки в уравнении, описывающем взаимодействие соседних узлов, имеет шесть степеней свободы ($U_x, U_y, U_z, R_x, R_y, R_z$), соответственно узлами передаются изгибающие моменты и нет податливых перемещений. Оболочечные элементы не имеют характеристик упругости в направлении, перпендикулярном плоскости элемента;

- объемными конечными элементами (solid). В этом случае каждый узел расчетной сетки в уравнении, описывающем жесткость взаимодействия соседних узлов, имеет три степени свободы (U_x, U_y, U_z), соответственно все узлы «шарнирные» (не передают моменты).

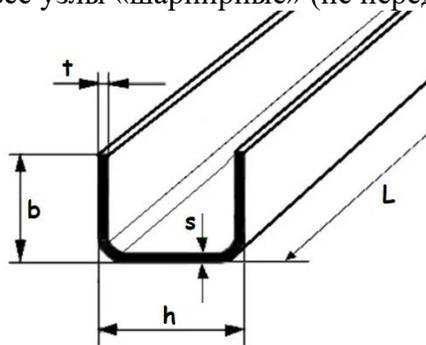


Рис. 3. Соотношение размеров профиля
Fig. 3. Profile size ratio

Для расчета применены сетки, различные по размеру — 5, 10, 25 и 50 мм. Использовались двумерные shell-элементы и трехмерные solid-элементы (рис. 4).

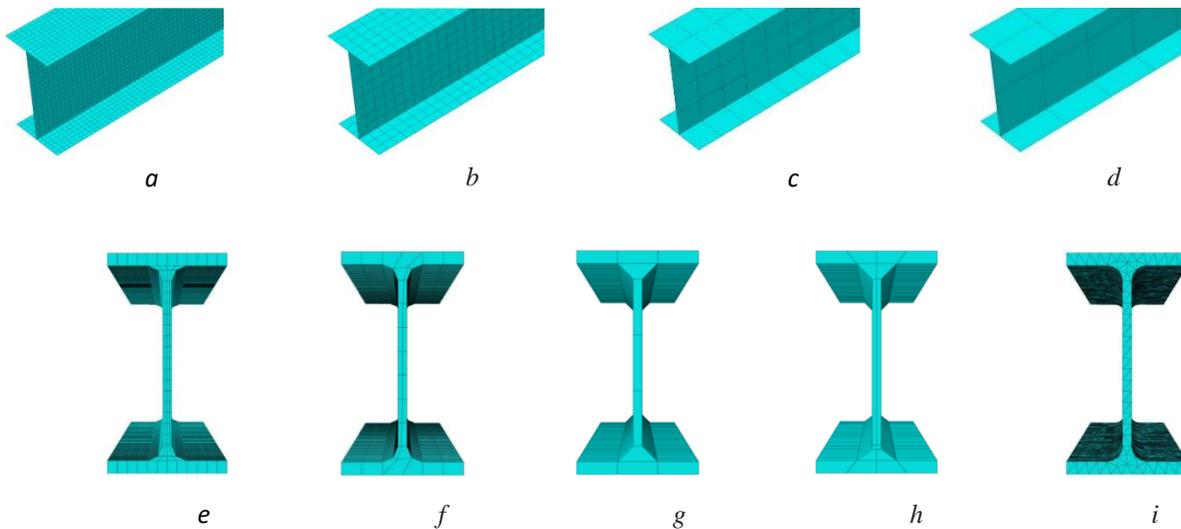


Рис. 4. Типы разбиения сетки (mesh) модели балки: *a* — shell 5 мм; *b* — shell 10 мм; *c* — shell 25 мм; *d* — shell 50 мм; *e* — solid 5 мм; *f* — solid 10 мм; *g* — solid 25 мм; *h* — solid 50 мм; *i* — triangular 5 мм

Fig. 4. Types of mesh division for the beam model: *a* — shell 5 mm; *b* — shell 10 mm; *c* — shell 25 mm; *d* — shell 50 mm; *e* — solid 5 mm; *f* — solid 10 mm; *g* — solid 25 mm; *h* — solid 50 mm; *i* — triangular 5 mm

Трехмерная модель использовалась для сравнения разных методов расчета: квадратичный/линейный, полный/сокращенный анализ (quadratic/linear, full/reduced integration). Сравни-

вались две модели с размерной сеткой 5 мм с гексагонами и тетраэдрами [15]. Для сравнительного анализа также использовались разные размерные сетки трехмерной модели, аналогичные двумерной — 5, 10, 25 и 50 мм.

Результаты сравнения примененных моделей по затратам времени расчета показаны на рис. 5.

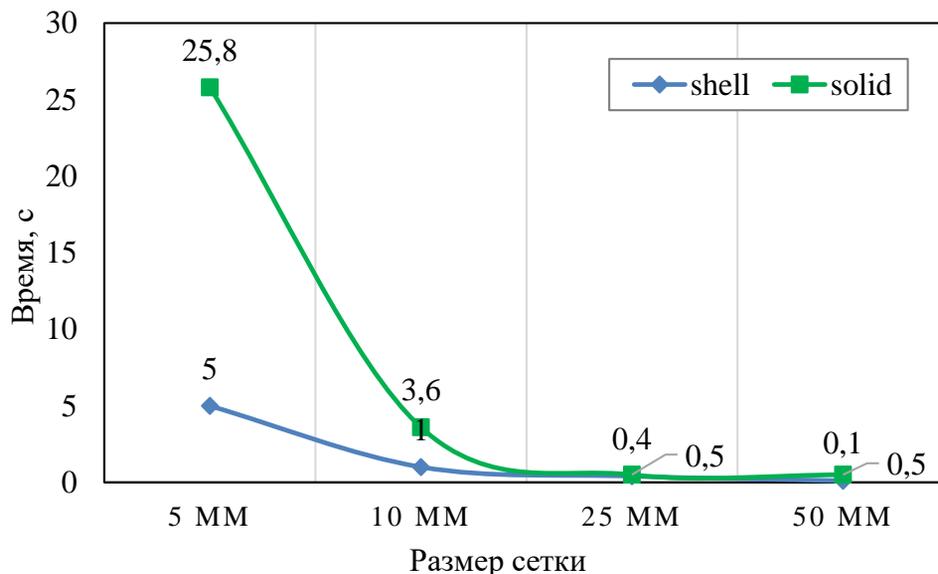


Рис. 5. Зависимость времени расчета от размера и типа сетки
Fig. 5. Dependence of calculation time on grid size and type

Для корректного решения по распространению изгибающих и крутящих моментов в конструкции требуется не менее 3-4 слоев элементов по толщине профиля (рис. 6). Это приводит к значительному росту количества элементов по длине профиля для обеспечения качества элементов. Так как каждый объемный элемент имеет геометрические характеристики в трех измерениях в собственной системе координат, он имеет упругую податливость во всех направлениях.

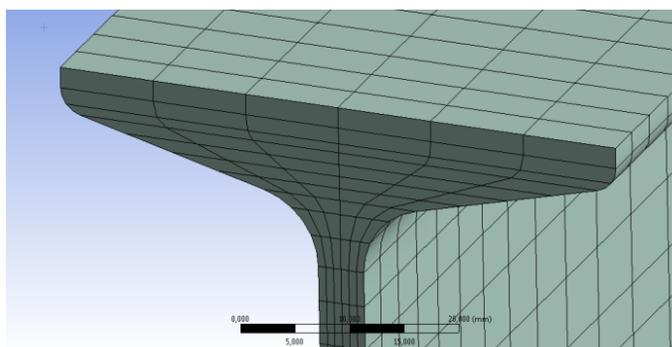


Рис. 6. Разбиение профиля при моделировании объемными конечными элементами (solid)
Fig. 6. Profile breakdown when modeling with solid finite elements

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение современных САЕ-пакетов для моделирования и анализа поведения подкрановых конструкций в различных условиях без необходимости создавать физические прототипы позволяет снизить материальные и временные затраты при исследовании НДС получивших повреждения эксплуатируемых металлических подкрановых конструкций. Внедрение численного моделирования подкрановых конструкций и их узлов позволяет уточнить расчетные схемы, учесть пространственную работу, реальные свойства материалов, в том числе и поведение материала за пределом упругости, неоднородности, вызванные повреждениями, приводящие к концентрации напряжений — увеличение напряжений в малых областях, прилегающих к местам неоднородностей [15, 16]. Опыт обследования производственных предприятий показывает, что разрушение зарождается в локальных зонах сечения, в местах резкого изменения формы сечения, в области конструктивных или технологических концентраторов напряжений: в сварных швах, краях отверстий, сопряжениях элементов конструкций, в местах механических повреждений и трещин металла.

Основные задачи при определении надежности подкрановых конструкций — установление закономерностей возникновения отказов, изучение влияния внешних и внутренних факторов на НДС, установление количественных характеристик и методов оценки надежности [17–19]. Для этого необходимо установить зависимость основных показателей надежности от параметров, ее определяющих: физических свойств материала и соединений конструкции, от процессов изменения этих свойств, от интенсивности эксплуатационных воздействий (грузоподъемности и режима работы кранов), наличия коррозионных повреждений с учетом случайного характера величин и процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Забродин М.П., Веселов В.В.* К определению ресурса работоспособности эксплуатируемых стальных подкрановых балок // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций : мат. V науч.-техн. конф. СПб. : ВИТУ, 2001. С. 21–24.
2. *Белый Г.И., Кубасевич А.Е.* Несущая способность подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 2 (91). С. 24–29.
3. *Кубасевич А.Е.* Работа подкрановых балок с усталостными трещинами в зоне сжатого пояса // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 3 (86). С. 64–70.
4. *Скляднев А.И., Сердюк В.В.* Усталостная долговечность и мера повреждаемости верхней зоны стенки сварных подкрановых балок // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 11. С. 34–36
5. *Забродин М.П., Свитин В.В., Веселов В.В.* К оценке технического состояния эксплуатируемых стальных подкрановых балок с определением ресурса их работоспособности // Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций : мат. VI науч.-техн. конф. СПб. : ВИТУ, 2002. С. 54–58.
6. *Веселов В.В.* Несущая способность эксплуатируемых стальных подкрановых балок по результатам натуральных обследований // Железнодорожный транспорт: проблемы и решения : межвуз. сб. науч. тр.. Вып. 6. СПб. : ПГУПС, 2003. С. 35–37.
7. *Белый Г.И., Кубасевич А.Е.* Влияние геометрических несовершенств сжатого пояса на несущую способность подкрановых балок с усталостными трещинами в стенке // Вестник гражданских инженеров. 2022. № 3 (92). С. 14–20.
8. *Фын Сю-Цзюнь, Линь Синь Шань, Фан Туан.* Исследование усталостных повреждений верхней зоны стенок стальных подкрановых балок // Промышленное и гражданское строительство. 1994. № 11=12. С. 33–35.
9. *Забродин М.П., Веселов В.В.* Расчет надежности и прогнозирование остаточного ресурса работоспособности эксплуатируемых стальных подкрановых балок // Исследование и разработки ресурсосберегающих технологий на ж/д транспорте : межвуз. сб. науч. тр. с междунар. участием. – Самара : СГАПС, 2002. С. 401–403.
10. *Castro J.T.P., Freire J.L.F., Vieira R.D.* Fatigue life prediction of repaired welded structures // Journal of Constructional Steel Research. 1994. Vol. 2 (28). Pp. 187–195.
11. *Dong S.E., Chen Q.* Probe on the Stress of the Support Crack of Welded Crane Beams // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 501, 504. Pp. 710–716.
12. *Rettenmeier P., Roos E., Weihe S.* Fatigue analysis of multiaxially loaded crane runway structures including welding residual stress effects // International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 82. Pp. 179–187.

13. Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). Издание официальное. М. : Стройиздат, 1989. 160 с.
14. Wardenier J., de Vries P., Timmerman G. Fatigue behaviour of a welded I-section under a concentrated compression (wheel) load // *Journal of Constructional Steel Research*. 2018. Vol. 140. Pp. 163–173.
15. Черныховский Б.А., Бузало Н.А., Алексеева А.С. Modeling of Damages of Steel Structures of Industrial Buildings // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1425 (1). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1425/1/012057/pdf>
16. Веселов В.В. Ресурсы работоспособности подкрановых балок при наличии дефектов и повреждений // *Вестник инженеров электромехаников ж/д транспорта*. – Самара : СГАПС, 2003. Вып. 1. С. 384–387.
17. Забродин М.П., Веселов В.В. К вопросу об определении эксплуатационной надежности стальных подкрановых балок // *Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций : мат. IX науч.-техн. конф.* СПб. : ВШУ, 2005. С. 46–49.
18. Орлова М.А., Козырев С.А. Реализация технологии информационного моделирования при проектировании конструкций одноэтажного производственного здания // *Железобетонные конструкции*. 2023. № 3 (3). С. 75–85. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.75-85
19. Тамразян А.Г. К анализу надежности конструкций балочных систем // *Железобетонные конструкции*. 2023. № 4 (4). С. 13–19. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.13-19

REFERENCES

1. Zabrodin M.P., Veselov V.V. Determining the service life of steel crane beams in operation. *Defects in buildings and structures. Reinforcement of building structures : materials from the 5th scientific and technical conference*. St. Petersburg, VITU, 2001; 21-24. (in Russian).
2. Belyi G.I., Kubasevich A.E. Load-bearing capacity of crane beams with fatigue cracks in the wall. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 2(91):24-29. (in Russian).
3. Kubasevich A.E. Operation of crane beams with fatigue cracks in the compressed belt zone. *Bulletin of Civil Engineers*. 2021; 3(86):64-70. (in Russian).
4. Sklyadnev A.I., Serdyuk V.V. Fatigue durability and damageability of the upper zone of the wall of welded crane beams. *Occupational Safety in Industry*. 2004; 11:34-36. (in Russian).
5. Zabrodin M.P., Svitin V.V., Veselov V.V. Assessment of the technical condition of steel crane beams in operation with determination of their service life. *Defects in buildings and structures. Reinforcement of building structures : materials from the 6th scientific and technical conference*. St. Petersburg, VITU, 2002; 54-58. (in Russian).
6. Veselov V.V. Load-bearing capacity of steel crane beams in operation based on the results of field surveys. *Railway transport: problems and solutions : interuniversity collection of scientific papers. Issue 6*. St. Petersburg, PGUPS, 2003; 35-37. (in Russian).
7. Belyi G.I., Kubasevich A.E. The influence of geometric imperfections in the compressed flange on the load-bearing capacity of crane beams with fatigue cracks in the web. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022; 3(92):14-20. (in Russian).
8. Fyn Xiu-Jun, Lin Xin Shan, Fang Tian. Investigation of fatigue damage to the upper zone of steel crane beam walls. *Industrial and Civil Construction*. 1994; 11-12:33-35. (in Russian).
9. Zabrodin M.P., Veselov V.V. Calculation of reliability and prediction of the residual service life of steel crane beams in operation. *Research and development of resource-saving technologies in railway transport : Interuniversity collection of scientific papers with international participation*. Samara, SGAPS, 2002; 401-403. (in Russian).
10. Castro J.T.P., Freire J.L.F., Vieira R.D. Fatigue life prediction of repaired welded structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 1994; 2(28):187-195.
11. Dong S.E., Chen Q. Probe on the Stress of the Support Crack of Welded Crane Beams. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 501-504:710-716.
12. Rettenmeier P., Roos E., Weihe S. Fatigue analysis of multiaxially loaded crane runway structures including welding residual stress effects. *International Journal of Fatigue*. 2016; 82:179-187.
13. Manual for the design of reinforced steel structures (to SNiP II-23-81*). Official publication. Moscow, Stroyizdat, 1989; 160. (in Russian).
14. Wardenier J., de Vries P., Timmerman G. Fatigue behaviour of a welded I-section under a concentrated compression (wheel) load. *Journal of Constructional Steel Research*. 2018; 140:163-173.
15. Chernykhovsky B.A., Buzalo N.A., Alekseeva A.S. Modeling of Damages of Steel Structures of Industrial Buildings. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020; 1425(1). URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1425/1/012057/pdf>
16. Veselov V.V. Resources for the operability of crane beams in the presence of defects and damage. *Bulletin of Railway Transport Electromechanical Engineers*. Samara, SGAPS, 2003; 1:84-387. (in Russian).

17. Zabrodin M.P., Veselov V.V. On the issue of determining the operational reliability of steel crane beams. *Defects in buildings and structures. Reinforcement of building structures : materials from the IX scientific and technical conference*. St. Petersburg, VSU, 2005; 46-49. (in Russian).

18. Orlova M.A., Kozyrev S.A. Implementation of Information Modelling Technology in Design of Structures of a Single-Storey Industrial Building. *Reinforced concrete structures*. 2023; 3(3):75-85. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.3.75-85 (in Russian).

19. Tamrazyan A.G. To the Analysis of the Reliability of Structures of Beam Systems. *Reinforced concrete structures*. 2023; 4(4):13-19. DOI: 10.22227/2949-1622.2023.4.13-19 (in Russian).