Транспортное машиностроение. 2025. № 11(47). С. 12-21. ISSN 2782-5957 (print)
Transport Engineering. 2025. no. 11(47). P. 12-21. ISSN 2782-5957 (print)

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 621
doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-12-21

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЗДЕЛИЙ КРАНОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Валерий Александрович Лебедев[1]✉, Николай Сергеевич Коваль[2], Олег Николаевич Котенко[3], Александр Александрович Доценко[4]
[1,2,3] ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия
[4] АО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент»», Ростов-на-Дону, Россия
[1] va.lebidev@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1838-245X
[2] koval-nc@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5787-9621
[3] kotenko.on@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4436-0094
[4] docenko_aa@gradient-md.ru, https://orcid.org/0009-0005-3784-7381

Аннотация

Крановое оборудование, являясь основным средством подъема различных грузов, относится к ответственным изделиям, обеспечение работоспособности которого является важной задачей. Основной причиной выхода их из строя является разрушение, ввиду наличия остаточных напряжений, формируемых на этапе сварки. Для снижения их величины используют различные методы, среди которых следует выделить, ввиду ряда преимуществ, вибрационную стабилизирующую обработку. Целью исследований является адаптация технологии вибрационной стабилизирующей обработки кранового оборудования с целью обеспечения его работоспособности. Эта задача решена путем применения современных программных средств, позволяющих осуществлять моделирование состояния кранового оборудования при различных условиях. В качестве основного метода исследований в работе принято моделирование методом конечных элементов. Построение виртуальных твердотельных трехмерных моделей изделия, определение его собственных частот колебаний и оценка напряженно-деформированного состояния осуществлялась методом КЭ в среде SolidWorks. Объектом исследований являлось изделие «Балка». В результате проведённых исследований сформулированы основные положения методологического подхода выбора и обоснования технологической схемы, режимов реализации вибрационной обработки, обеспечивающей стабилизацию напряженного состояния изделий кранового оборудования без проведения громоздких экспериментальных исследований.

Ключевые слова: оборудование, напряжение, вибрационная стабилизирующая обработка, работоспособность.

Ссылка для цитирования:
Лебедев В.А. Стабилизация напряженного состояния изделий кранового оборудования вибрационной обработкой / В.А. Лебедев, Н.С. Коваль, О.Н. Котенко, А.А. Доценко // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 11. – С. 12-21. doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-12-21.

Original article
Open Access Article

STABILIZATION OF THE STRESSED STATE OF CRANE EQUIPMENT ARTICLES BY VIBROMECHANICAL TREATMENT

Valery Aleksandrovich Lebedev[1], Nikolay Sergeevich Koval[2], Oleg Nikolaevich Kotenko[3], Aleksandr Aleksandrovich Dotsenko[4]
[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia
[4] All-Russian Scientific Research Institute Gradient, Rostov-on-Don, Russia
[1] va.lebidev@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-1838-245X
[2] koval-nc@mail.ru, https://orcid.org/0000-0002-5787-9621
[3] kotenko.on@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0003-4436-0094
[4] docenko_aa@gradient-md.ru, https://orcid.org/0009-0005-3784-7381

Abstract

Crane equipment, being the main means of lifting various loads, is one of the responsible products, ensuring the working capacity of which is an important task. The main reason for their failure is destruction, due to the presence of residual stresses formed at the welding stage. To reduce their value, various methods are used, involving vibromechanical stabilizing treatment, which has a number of advantages. The study objective is to adapt the technology of vibromechanical stabilizing treatment of crane equipment in order to ensure its operability. This task is solved by using modern software tools that allow modeling the condition of crane equipment under various conditions. The paper uses finite element modeling as the main research method. The construction of virtual solid-state three-dimensional models of the article, the determination of its natural oscillation frequencies and the assessment of the stress-strain state were carried out by finite element method in SolidWorks. The study object was the article called "Balka". As a result of the conducted research, the main provisions of the methodological approach to the selection and improvement of the engineering scheme, modes of vibromechanical treatment, which ensures stabilization of the stress state of crane equipment articles without conducting a large number of experimental studies, are formulated.

Keywords: equipment, stress, vibromechanical stabilizing treatment, operability.

Reference for citing:
Lebedev VA, Koval NS, Kotenko ON, Dotsenko AA. Stabilization of the stressed state of crane equipment articles by vibromechanical treatment. Transport Engineering. 2025;11:12-21. doi: 10.30987/2782-5957-2025-11-12-21.

Введение

Крановое оборудование, являясь основным средством подъема различных грузов, относится к ответственным изделиям, обеспечение работоспособности которого является важной задачей. Нарушение технологии изготовления или сборки таких изделий приводит не только к потери поднимаемого груза, но и к падению самого крана.

Основные элементы конструкции кранового оборудования (башня, стрела, консоль, хобот) имеют большую протяженность (50 м и более) и массу, в связи, с чем традиционно собираются из отдельных сварных изделий. Как известно в процессе сварки происходит формирование растягивающих остаточных напряжений, оказывающих отрицательное влияние на прочность конструкции. С целью их снятия используют различные методы термической обработки, старение, вибрационную стабилизирующую обработку (ВСО) и т.д. Последний метод, учитывая массогабаритные характеристики кранового оборудования и производительность процесса в целом, является наиболее приемлемым. Стоит отметить, что, не смотря на широкое применение ВСО, для ее эффективной реализации в каждом конкретном случае, необходимо проведение комплекса исследований, направленных на получение прогрессивной технологии. Применительно к крановому оборудованию технология ВСО не адаптирована, соответствующие исследования не проводились. Таким образом, расширение знаний в области ВСО в целом и применительно к обеспечению работоспособности и долговечности кранового оборудования является важной научно-технической задачей, требующей скорейшего разрешения.

Применение современных программных средств, позволяющих осуществлять моделирование состояния кранового оборудования при различных условиях, открывает возможность выработки новых методологических подходов к решению важных вопросов, в том числе и возникающих при разработке технологии ВСО. В этой связи, проводимый комплекс исследований направленный на разработку, адаптацию технологии ВСО кранового оборудования с целью обеспечения его работоспособности, является актуальным.

Сущность вибрационной стабилизирующей обработки

Адаптация ВСО изделий кранового оборудования заключается в выборе рациональной технологической схемы (ТС) и режимов обработки. На практике ВСО может быть реализована следующими способами: закреплением на изделии одного или нескольких вибровозбудителей, периодическим нанесением на поверхности изделия ударов, приводящих к совершению им собственных колебаний после каждого

удара. В первом случае могут применяться вибровозбудители различного принципа действия, при установке изделия на определенное количество жестких или упругих опор [1-5]. Так же немаловажными являются вопросы, связанные с определением направления действия возбуждающей силы и характера ее воздействия на обрабатываемое изделие.

Технологический режим процесса ВСО характеризуется следующими параметрами: типом воздействия на деталь (гармоническое, ударное), частотой возбуждаемых вибраций, сдвигом по фазе (если вибровозбудителей два и более), амплитудой возбуждения.

Исследованием процесса ВСО деталей и сварных конструкций из малоуглеродистых сталей занимались А.С. Аверин, Е.П. Оленин, И.Б. Гудонис, А.М. Мейстер и др [6-8]. Анализ результатов их работ позволяет сделать вывод об успешном применении ВСО с целью снятия ОН и предотвращения коробления изделий. Наиболее эффективным является обработка изделий, обладающих большой деформационной способностью, к которым можно отнести некоторые сварные конструкции. Основной причиной положительного эффекта применения ВСО объясняется тем, что собственные частоты изгибных колебаний обрабатываемых деталей лежали в рабочем диапазоне используемых вибровозбудителей. Вибрационное воздействие на изделие производилось с частотой, соответствующей первой собственной частоте изделия. Таким образом, решаются задачи снижения энергопотребления с одновременным созданием максимально возможных нагрузок (амплитуд). Однако следует отметить, что для крупногабаритных изделий, в том числе и сварных, собственные частоты могут лежать вне диапазона частот вибровозбудителей. Эффективность применения ВСО в этом случае мало изучена. Для выхода из ситуации, как правило, используют несколько вибровозбудителей. Назначение режимов и мест крепления вибровозбудителей осуществляется преимущественно экспериментальным путем.

К общим эмпирическим правилам назначения режимов ВСО можно отнести:

– обеспечение возможности свободного коробления изделия в процессе ВСО;

– вибрационное нагружение должно вызывать максимально возможный изгиб изделия.

Существующие методики определения собственных частот колебаний обрабатываемых изделий подразумевают чаще всего экспериментальный подход. Например, с целью определения места расположения вибровозбудителя и назначения режимов, используют тензометрические датчики и различную измерительную аппаратуру. Измеряя падение напряжения на датчиках с помощью осциллографа, устанавливают максимальные прогибы и делают соответствующие выводы. Процесс весьма трудоемок, дорог и длителен.

Широкое распространение в последнее время получили программные средства, реализующие численные методы моделирования, в частности метод конечных элементов (КЭ) [9-13]. Их применение возможно для определения резонансных частот деталей и изделий (в том числе сварных) различной конструкции и сложности. Кроме того, возможна оценка напряженно-деформированного состояния конструкции при обработке [14-18]. На основе этих данных может быть дана оценка жесткости конструкции в целом, определены рациональные точки крепления вибровозбудителя на изделии и их количество, а также оптимальное число и тип опор. Таким образом, создается возможность формирования принципиально нового подхода к назначению и обоснованию режимов ВСО.

Адаптация ВСО рассмотрена на примере изделия «Балка» (рис.1), которое является частью «Хобота» портального крана. Оно представляет собой полое сварное изделие, изготовленное из сортового материала (плиты, листы), толщина которого достигает 30мм (рис. 1). В качестве материала отдельных деталей использована сталь марки *S*355*J*2*G*3 и *S*355*NL*.

«Балка» относится к длинномерным изделиям (длина порядка 20 м) и имеет переменное сечение по всей своей протяжен-

ности. Размеры сечения передней части составляет 550×650 мм, места установки проушин для крепления стрелы – 1750×650 мм, задней части – 964×650 мм. Теоретическая масса изделия согласно конструкторской документации – 9059 кг.

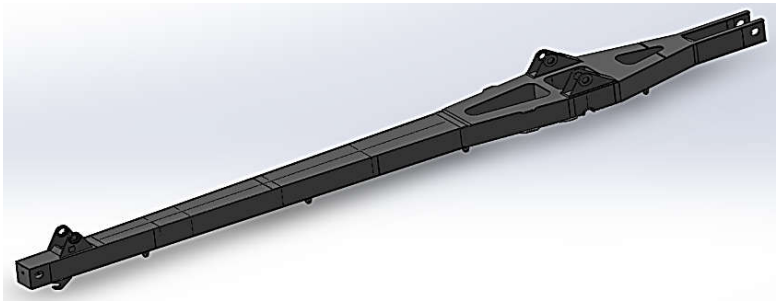


Рис. 1. Конструкция изделия «Балка»
Fig. 1. Design of "Balka" article

Технология изготовления изделия предусматривает наличие значительного объема сварочных работ, а также механической обработки, которые являются источником появления остаточных напряжений (ОН) в конструкции. Проводимые контрольные мероприятия позволяют избежать появления бракованных изделий. Однако вероятность появления трещин в сварных соединениях остается высокой в условиях эксплуатации изделия или при его транспортировке. Причиной возникновения дефектов может быть перераспределение ОН в конструкции с течением времени. Таким образом, разработка технологии, направленной на снятие ОН и ее адаптация для изделия кранового оборудования является актуальной проблемой.

Методы и средства исследования

В качестве основного метода исследований в работе принято моделирование. Построение виртуальных твердотельных трехмерных моделей (ВТТМ) изделия, определение его собственных частот колебаний (СЧК) и оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) осуществлялась методом КЭ в среде *SolidWorks* (модуль *Simulation*).

На рис. 2 представлены принятые схемы закрепления ВТТМ «Балка».

ВТТМ изделия, размеры которой соответствовали конструкторской документации, проверялась на наличия интерференции. Далее с целью упрощения работы с моделью и исключения ошибок на этапе построения сетки, производилась ее оптимизация по нескольким направлениям.

1. Объединение ВТТМ деталей, подлежащих сварке в единое целое. При этом принималось допущение о прочности шва равного основному материалу деталей.

2. Корректировка геометрии ВТТМ деталей. Элементы, например, резьбы, фаски, наличие которых не влияет на результат моделирования, исключались из их структуры. Контакт ВТТМ деталей типа «линия» - «плоскость» изменялся на контакт типа «плоскость» - «плоскость».

Определение СЧК в условиях гармонических колебаний изделия включало в себя следующие этапы.

1. Загрузка откорректированной ВТТМ изделия в среду *SolidWorks*.

2. Назначение материалов ВТТМ деталей изделия.

3. Задание граничных условий.

4. Задание параметров расчета (число определяемых СЧК, выбор решателя).

5. Выбор параметров сетки и ее построение.

6. Запуск расчета.

7. Вывод результатов моделирования и их последующая формализация при необходимости.

Вариант по схеме I предусматривает «Жесткую связь» поверхности изделия с опорами, и таким образом не обеспечивает поддержку упругости изделия в процессе его виброколебаний и как следствие свободное коробление изделия. Схемы II-IV обеспечивают поддержку упругости изде-

лия и потому являются предпочтительными для протекания процесса вибростабилизации. Жесткость опор получена исходя из расчета распределенной нагрузки, воспринимаемой каждой из них. С помощью этих данных производился выбор их материала. В качестве параметров моделирования принято: количество резонансных частот – 500, решающая программа – *FFEPlus*.

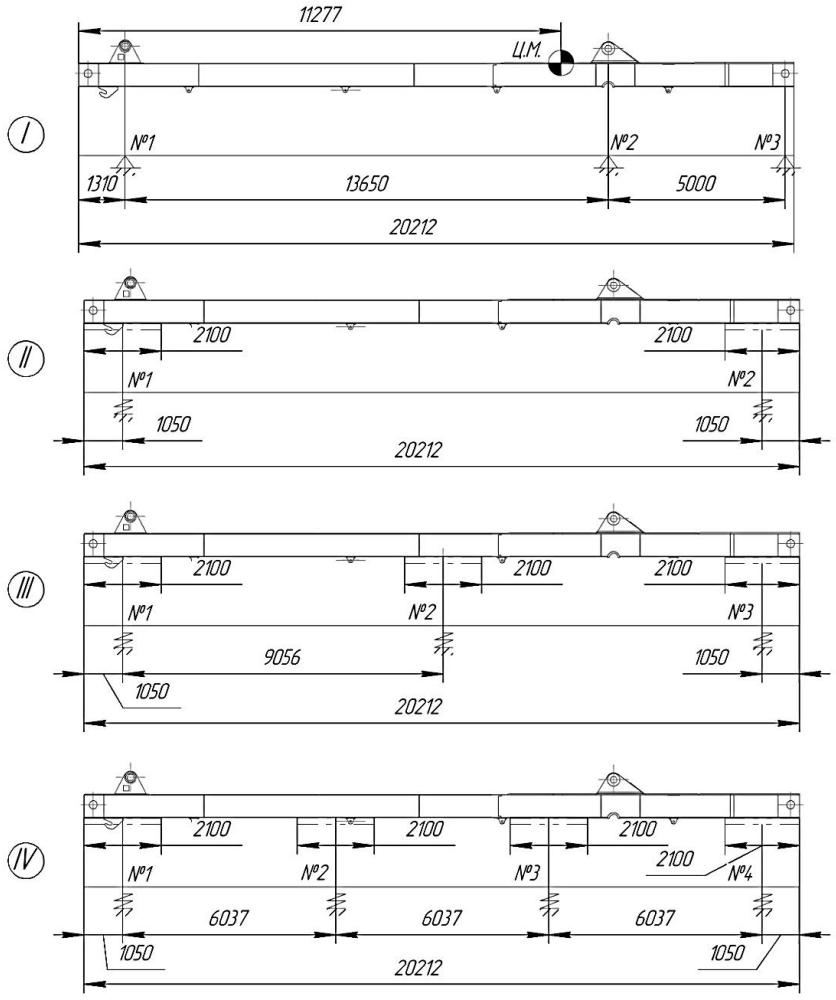


Рис. 2 . Схемы закрепления ВТТМ «Балка» при моделировании:
I – на жесткие установочные элементы в трех точках: II – на упругие элементы в двух точках; III – на упругие элементы в трех точках;
IV – на упругие элементы в четырех точках
Fig. 2. Diagrams of fixing "Balka" article during modeling: I – on rigid mounting elements at three points: II – on elastic elements at two points; III – on elastic elements at three points; IV – on elastic elements at four points

Результаты моделирования СЧК ВТТМ «Балка»

В результате выполненного моделирования, определены собственные частоты колебаний. Значения первых 10 частот для соответствующих схем закрепления ВТТМ «Балка» представлены в виде графика, показанном на рис. 3. Коэффициенты массового участия (EMPF) практически равны единице, что говорит о достоверности проведенных расчетов. Схема установки изделия значительно влияет на его резонансные частоты. Максимальное значение частот наблюдается при жестком закреплении и снижается при увеличении количества демпфирующих элементов. Так же следует отметить, что частотный диапазон ВСО для всех рассматриваемых схем можно реализовать с помощью современных универсальных вибровозбудителей.

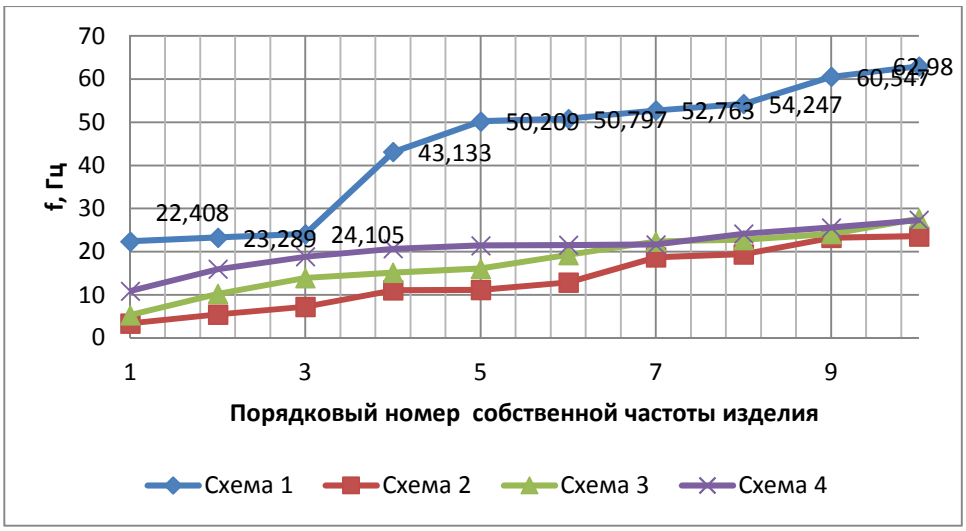
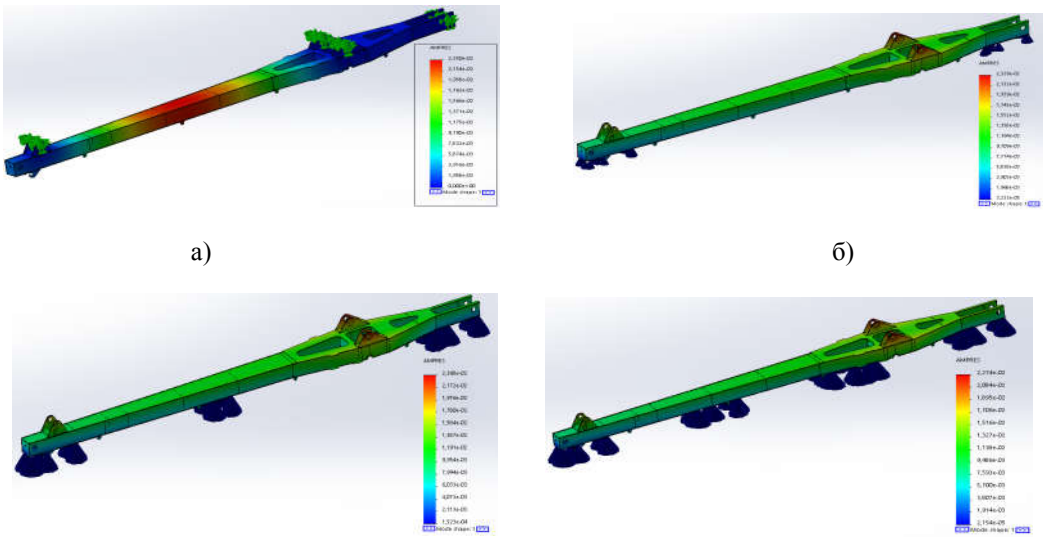


Рис. 3. Собственные частоты колебаний ВТТМ «Балка» при различных схемах реализации ВСО

Fig. 3. Natural oscillation frequencies of "Balka" article under various conditions of vibromechanical treatment

На рис. 4 показано распределение амплитуд колебаний по длине ВТТМ «Балка» на основной резонансной частоте при различных схемах ее установки.



а) б)

в) г)

Рис. 4. Величина амплитуды колебаний ВТТМ «Балка» на основной резонансной частоте при схеме установки: а – I; б – II, в – III, г – IV

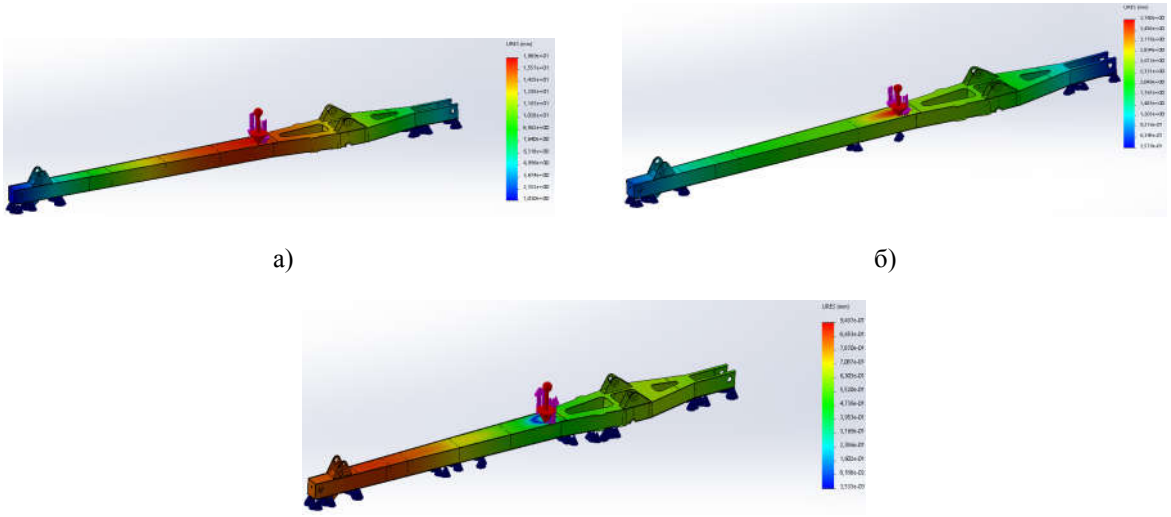
Fig. 4. Value of the amplitude of "Balka" article vibrations at the main resonant frequency in the installation layout: a – I; b – II, c – III, d – IV

Значение амплитуд колебаний для всех схем закрепления изделия практически одинаково и составляет порядка 0,03 мм. Следует отметить различный характер их распределения по длине изделия при использовании жестких и упругих опор. В первом случае конструкция нагружена лишь частично, между двумя опорами, остальной участок изделия статичен при восприятии нагрузки. Для остальных схем закрепления, конструкция по длине нагружена практически равномерно, что является предпочтительным для реализации ВСО. В этой связи схема с жестким закреплением в дальнейшем не рассматривалась.

Результаты оценки НДС изделия

Оценка НДС ВТТМ «Балка» проводилась методом КЭ для условий закрепления изделия на упругих опорах и одновибраторной схемы ВСО. В качестве источника колебаний принят вибровопривод *HV*55/2, оснащенный дебалансным типом вибровозбудителя. Он способен работать в требуемом частотном диапазоне и создавать при этом максимальную центробежную силу 25 кН. Нагрузка была расположена в плоскости центра масс ВТТМ и направлена к опорам. Кроме центробежной силы, создаваемой вибровозбудителем, так же учитывалась нагрузка действия силы тяжести на изделие *Gravity*. Она рассчитывается автоматически путем умножения заданного ускорения свободного падения на массу изделия. Значения жесткости опор оставлено без изменений.

Значения деформаций конструкции ВТТМ «Балка», вызванных воздействием максимальной нагрузки показаны на рис. 5.



а) б)

в)

Рис. 5. Величина деформаций в конструкции ВТТМ «Балка» после единичного воздействия 25кН в процессе ВСО в зависимости от количества упругих опор:
а – двух; б – трех; в – четырех

Fig. 5. Value of "Balka" article deformations after single 25kN impact during vibromechanical treatment, depending on the number of elastic supports: a – two; b – three; c – four

Так же установлены значения напряжений, возникающие при нагружении конструкции и коэффициенты запаса прочности по пределу текучести для разных вариантов реализации ВСО. Полученные в результате моделирования данные сгруппированы в таблице.

Таблица

Параметры, характеризующие прочность и напряженно-деформированное состояние изделия при различных схемах закрепления при ВСО

Table

Parameters characterizing the strength and stress-strain state of the article under various fastening schemes during vibromechanical treatment

Схема закрепления	2	3	4
Коэффициент запаса прочности по пределу текучести	0,731	2,08	9,6
Максимальные напряжения , МПа	376	132	28

Учитывая, что одним из критериев реализации ВСО является отсутствие после нее критических деформаций, что обеспечивает сохранение целостности конструкции, единственной целесообразным вариантом является схема 4. Оконча-

тельное решение о назначении режимов ВСО можно принимать после рассмотрения вопроса оптимизации, оценки усталостной прочности изделия и экспериментальной апробации полученных результатов исследований.

Заключение

Результаты выполненных исследований являются методологической базой для адаптации ВСО, для снятия остаточных напряжений изделий кранового оборудования. Моделирование изделий, с использованием метода КЭ, позволяет, как показано на примере изделия «Балка», провести выбор и обоснование технологической схемы, режимов реализации ВСО обеспечивающей стабилизацию напряженного состояния изделий кранового оборудования без проведения громоздких экспериментальных исследований.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 224 с.
2. Вологдин В.П. Деформации и внутренние напряжения при сварке судовых конструкций. – М.: Оборонгиз, 1945 – 146 с.
3. Колтунов М.А. Ползучесть и релаксация. – М.: Высшая школа, 1976–277 с.
4. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. . Методы теории функций комплексного переменного. - М.: Наука, 1973. — 736 с.
5. Мун Ф. Чатопадхайн С. Волны напряжений, возбуждаемые магнитным полем в проводящем теле. Теория и эксперимент// Нестационарные процессы в деформируемых телах. –М.: 1976.-С.97-115.
6. Регель В.Р., Слуцкер А.И.,Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел.-М.: Наука, 1974.-560с.
7. Сагалевич В М. Снижение остаточных напряжений в сварных конструкциях вибрационной обработкой / Сагалевич В. М., Аверин А. С., Нашивочников В. В.. — Москва : Б. и., 1983. — 11 с. : граф. : 29 см.,
8. Трощенко В.Т. Деформирование и раразрушение металлов при много цикловом нагружении. - Киев: наукова думка, 1981.-340с.
9. Jun, Tea-Sung & Korsunsky, Alexander. (2010). Evaluation of residual stresses and strains using the Eigenstrain Reconstruction Method. International Journal of Solids and Structures. 47. 1678-1686. 10.1016/j.ijsolstr.2010.03.002. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2010.03.002
10. Kartal, M.E., Lijedahl, C.D.M., Gungor, S., Edwards, L., Fitzpatrick, M.E., 2008. Determination of the profile of the complete residual stress tensor in a VPPA weld using the multi-axial contour method. Acta Materialia 56 (16), 4417– 4428.
11. Korsunsky, A.M., Vorster, W.J.J., Zhang, S.Y., Topic, M., Venter, A.M., 2008. A beambending eigenstrain analysis of residual elastic strains in multi-scan laserformed steel samples. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C – Journal of Mechanical Engineering Science 222 (9), 1635–1645.
12. Qian, X.Q., Yao, Z.H., Cao, Y.P., Lu, H., 2005. An inverse approach to construct residual stresses existing in axisymmetric structures using BEM. Engineering Analysis with Boundary Elements 29 (11), 986–999.
13. Song, X., Chardonnet, S., Savini, G., Zhang, S.Y., Vorster, W.J.J., Korsunsky, A.M., 2008. Experimental/modelling study of residual stress in Al/SiCp bent bars by synchrotron XRD and slitting eigenstrain methods. Stress Evaluation in Materials Using Neutrons and Synchrotron Radiation, 277–282.
14. Ueda, Y., Fukuda, K., Kim, Y.C., Yamazaki, T., 1984. New measuring method of axisymmetric three dimensional residual stresses using inherent strains as parameters. Transactions of JWRI 13 (1), 105–114.
15. Gür, C. Hakan. (2024). Residual Stress. 10.31399/asm.hb.v04F.a0007015. DOI:10.31399/asm.hb.v04F.a0007015.
16. Yazdani Nezhad, Hamed & O'Dowd, Noel. (2015). Creep Relaxation in the Presence of Residual Stress. Engineering Fracture Mechanics. 138. 10.1016/j.engfracmech.2015.03.037. DOI:10.1016/j.engfracmech.2015.03.037.
17. Y. Lei and D.W. Dean. Finite element validation of the method used to estimate the creep crack tip charactering parameters for combined primary and secondary stresses. In Proceeding of 19th conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT19), 2007.
18. Y. Lei, N.P. O'Dowd, and G.A. Webster. Analysis of a crack in a residual stress field. Int. J. Fract., 106(3):195–216, 2000.

REFERENCES

1. Birger IA. Residual stresses. Moscow: Mashgiz; 1963.
2. Vologdin VP. Deformations and internal stresses during welding of ship structures. Moscow: Oborongiz; 1945.

3. Koltunov MA. Creep and relaxation. Moscow: Vysshaya Shkola; 1976.
4. Lavrentyev MA, Shabat BV. Theory methods of functions of complex variable. Moscow: Nauka; 1973.
5. Moon F, Chatopadhain S. Stress waves caused by a magnetic field in a conducting body. Theory and experiment. Unsteady processes in deformable bodies. Moscow; 1976.
6. Regel VR, Slutsker AI, Tomashevsky EE. Kinetic nature of the strength of solids. Moscow: Nauka; 1974.
7. Sagalevich VM, Averin AS, Nashivochnikov VV. Reduction of residual stresses in welded structures by vibration treatment. Moscow; 1983.
8. Troshchenko VT. Deformation and crushing of metals under multi—cycle loading. Kiev: Naukova Dumka; 1981.
9. Jun, Tea-Sung, Korsunsky, Alexander. Evaluation of residual stresses and strains using the Eigenstrain reconstruction method. International Journal of Solids and Structures [Internet]. 2010;47:1678-1686. DOI:10.1016/j.ijsolstr.2010.03.002.
10. Kartal ME, Lijedahl CDM, Gungor S, Edwards L, Fitzpatrick ME. Determination of the profile of the complete residual stress tensor in a VPPA weld using the multi-axial contour method. Acta Materialia. 2008;56(16):4417– 4428.
11. Korsunsky AM, Vorster WJJ, Zhang SY, Topic M, Venter AM. A beambending eigenstrain analysis of residual elastic strains in multi-scan laserformed steel samples. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C – Journal of Mechanical Engineering Science. 2008;222(9):1635–1645.
12. Qian XQ, Yao ZH, Cao YP, Lu H. An inverse approach to construct residual stresses existing in axisymmetric structures using BEM. Engineering Analysis with Boundary Elements. 2005;29(11):986–999.
13. Song X, Chardonnet S, Savini G, Zhang SY, Vorster WJJ, Korsunsky AM. Experimental/modelling study of residual stress in Al/SiCp bent bars by synchrotron XRD and slitting eigenstrain methods. Stress Evaluation in Materials Using Neutrons and Synchrotron Radiation. 2008;277–282.
14. Ueda Y, Fukuda K, Kim YC, Yamazaki T. New measuring method of axisymmetric three dimensional residual stresses using inherent strains as parameters. Transactions of JWRI 1984.;13(1):105–114.
15. Gür C, Hakan. Residual stress [Internet]. 2024. Available from: 10.31399/asm.hb.v04F.a0007015. DOI:10.31399/asm.hb.v04F.a0007015.
16. Yazdani N, Hamed, O'Dowd, Noel. Creep relaxation in the presence of residual stress. Engineering Fracture Mechanics [Internet]. 2015;138. Available from: 10.1016/j.engfracmech.2015.03.037. DOI:10.1016/j.engfracmech.2015.03.037.
17. Lei Y, Dean NP. Finite element validation of the method used to estimate the creep crack tip characteristing parameters for combined primary and secondary stresses. In Proceeding of 19th conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT19); 2007.
18. Lei Y, O'Dowd NP, Webster GA. Analysis of a crack in a residual stress field. Int. J. Fract. 2000;106(3):195–216.

Информация об авторах:

Лебедев Валерий Александрович - кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения», Донской государственный технический университет, тел. 89515395159.
Коваль Николай Сергеевич - кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры « Приборостроение и биомедицинская инженерия"», Донской государственный технический университет, тел. 89045066817.

Котенко Олег Николаевич - аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственный технический университет, тел. 89281220723.
Доценко Александр Александрович – начальник департамента АО «Всероссийский научно-исследовательский институт «Градиент»», тел. 8 (863) 232-47-70.

Lebedev Valery Aleksandrovich - Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University, phone: 89515395159.
Koval Nikolay Sergeevich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, of the Department of Instrumentation and Biomedical Engineering, Don State Technical University, phone: 89045066817.

Kotenko Oleg Nikolaevich - Postgraduate Student at the Department of Mechanical Engineering Technology, Don State Technical University, phone: 89281220723.
Dotsenko Aleksandr Aleksandrovich - Head of the Department of All-Russian Scientific Research Institute Gradient, phone: 8 (863) 232-47-70.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 03.10.2025; одобрена после рецензирования 09.10.2025; принята к публикации 27.10.2025. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 03.10.2025; approved after review on 09.10.2025; accepted for publication on 27.10.2025. The reviewer is NagorkinM.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.