

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-26-35

\*Аль-Сабаети А.К., Абсиметов В.Э.

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова

\*E-mail: kacem90@bk.ru

## РАСЧЕТ НДС РАМНЫХ УЗЛОВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ ПРИ ИХ УСИЛЕНИИ

**Аннотация.** Опыт эксплуатации усиленных металлоконструкций промышленных зданий показал, что при усиленном воздействии статических нагрузок редко выходят из строя узлы рамных элементов, что нельзя отметить в случае длительного приложения динамических нагрузок. Как правило, разрушению подвергаются сварные соединения креплений элементов усиления, что послужило причиной проведения данного исследования. В ходе работ выявлено влияние остаточных сварочных напряжений на долговечность усиленных рамных узлов при воздействии динамических нагрузок. Использован метод численного моделирования с применением программного комплекса Ansys SpaceClaim. Вибрационная прочность швов обуславливается высотой катета сварных соединений, связанных с переходом материала в стадию деформирования и смещения узлов конструкций, подвергающихся циклическому нагружению. Следует отметить, что усталостное разрушение подразделяют на две категории: многоцикловая усталость и малоцикловая усталость. Многоцикловая усталость, когда число циклов приложения нагрузки велико (порядка  $1e^4 - 1e^9$ ). При такой постановке обычно уровень напряжений более низкий, в сравнении с пределом прочности материала. Оценка долговечности, в зависимости от уровня напряжений, обычно используется для расчета многоцикловой усталости. Малоцикловая усталость, когда число циклов прикладываемой нагрузки относительно невелико. Пластические деформации часто ассоциируются с расчетом малоцикловой усталости, это приводит к уменьшению времени усталостной долговечности. Оценка долговечности в зависимости, от уровня деформаций, более применима к расчету малоцикловой усталости.

**Ключевые слова:** металлические конструкции, рамные узлы, долговечность, многоцикловая усталость, остаточное сварочное напряжение, усиления.

**Введение.** Применение на практике усиленных металлических конструкций дает возможность сделать вывод, что одной из основных причин, приводящих к их разрушению, является усталость [1–4].

Среди показателей усталостной прочности металлоконструкций наиболее распространенным является понятие вибрационной прочности. В данной статье рассматривается вибрационная прочность рамных узлов [5, 6]. Для оценки долговечности усиленных рамных узлов металлоконструкций использован метод моделирования, для чего разработана и реализована конечно-элементная модель с применением программы Ansys [7–10].

Характеристики циклов напряжений:

Рассматривается случай с постоянной амплитудой пропорциональной нагрузкой, с  $\min$  и  $\max$  значениями напряжений  $\sigma_{\min}$  и  $\sigma_{\max}$ :

– Диапазон напряжений цикла  $D_s$  определяется  $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$

– Среднее напряжение цикла  $\sigma_m$  определяется  $(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ . В данном случае наибольшее значение напряжения цикла соответствует  $D_s/2$ . Показатель асимметрии  $R$  при этом равняется  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ . Также, под симметричным циклом нагружения подразумевается цикл, в котором наибольшее и наименьшее значения напряжения равны по величине и противоположны по знаку. В данном случае  $\sigma_m = 0$ ;  $R = -1$ .

– Знакопостоянный цикл характеризуется в качестве отнулевого (пульсирующего) цикла. Он преобразуется от нуля до максимума —  $\sigma_m = \sigma_{\max}/2$ ;  $R = 0$ .

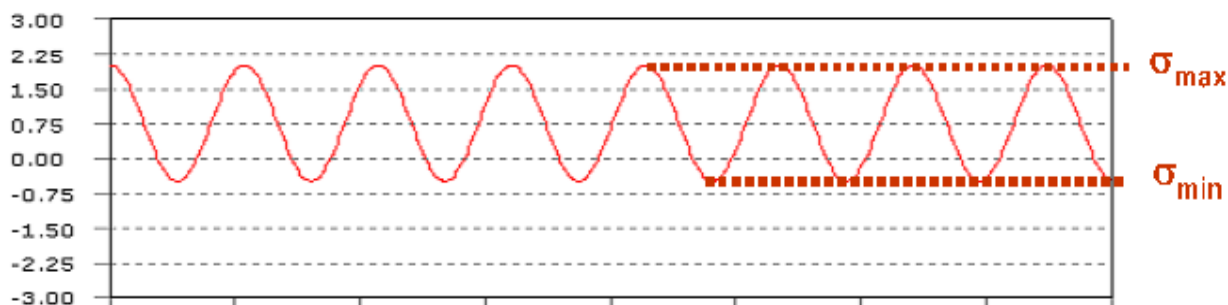


Рис. 1. Размах напряжений цикла

Проведение расчета на усталостную долговечность базируется на принципах проведения линейного статического расчета. Несмотря на то, что расчет усталостной долговечности относится к разделу циклической или повторяющейся нагрузки, как видно на рис. 1, результаты основываются на линейной статике, а не на гармоническом виде анализа. Так же надо понимать, что даже, если нелинейности присутствуют в расчетной модели, то расчет усталостной долговечности все равно будет проводиться в линейной постановке, и это надо учитывать при оценке результатов.

Много факторов влияют на данные кривой усталости, некоторые из них перечислены ниже:

1. Пластичность материала, способы механической и других обработок материала.

2. Топология геометрии, включая параметры шероховатости поверхности, остаточные напряжения, и наличие концентраторов напряжений.

3. Условия нагружения, включая средние напряжения цикла, температурное состояние, химический состав.

Отметим, что в сфере многоциклового усталости долговечность выражается как функция от показателей цикла напряжений. Такое описание является общепринятым [12, 13].

В большинстве зарубежных трудов данный подход характеризуется как SN подход. Соответственно, кривая носит также название SN, по причине определения осей координат на английском языке [14]. Схематичный вид кривой SN для различных материалов представлен на рис. 2:

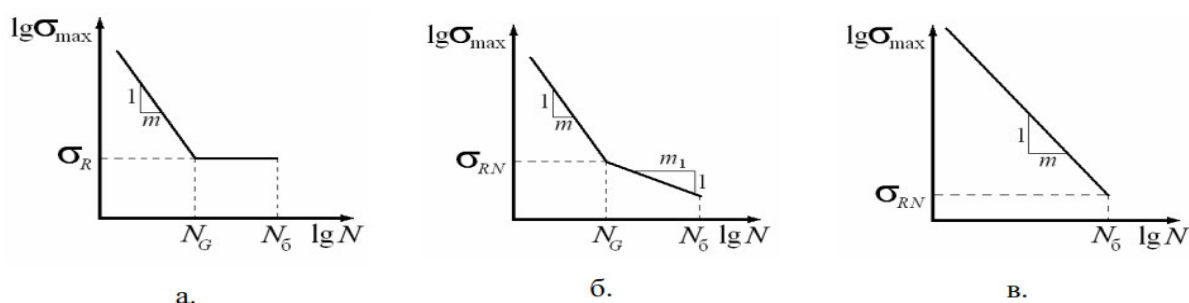


Рис. 2. Схематичный вид кривой SN для различных материалов: углеродистые и среднелегированные стали (а), алюминий, медь и их сплавы и нержавеющие стали (б) и высокопрочные стали и титановые сплавы (в)

В настоящее время в практике для разных видов кривой применяется уравнение, предложенное М. Басквиным.

Статический расчет использовался для анализа конструкции на многоцикловое воздействие. Применялся симметричный цикл посеянного нагружения:  $R = -1$ ; амплитуда цикла 1 как видно на рис.3.

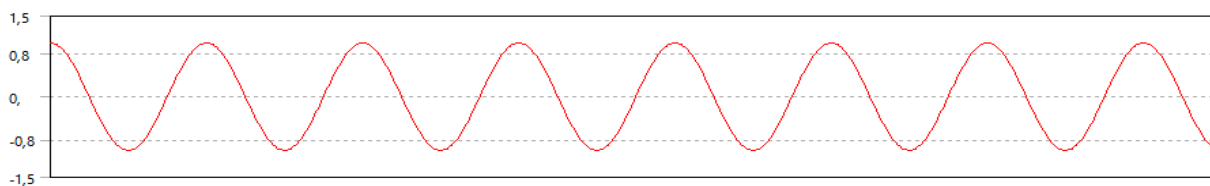


Рис.3. Осесимметричный цикл для многоциклового задачи.

Методы исследований. Для решения поставленной задачи использовано моделирование, с применением программы Ansys SOLID186.

Получены результаты в виде:

1. Суммарных перемещений;
2. Эквивалентных напряжений по 4-й теории прочности;
3. Количества циклов до разрушения после многоциклового нагружения;
4. Силы реакции в заделке.

На рис. 4 приведена конечно-элементная модель, а также 3D-модель элемента «Колонна – Балка».

CAD-моделирование была применена программа Ansys SpaceClaim.

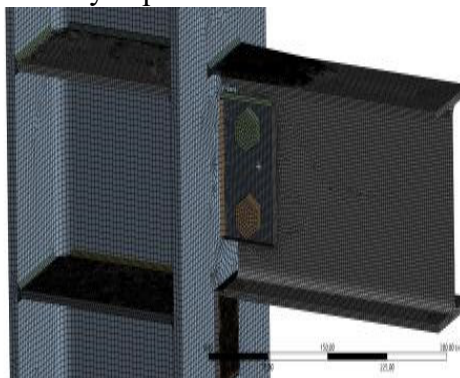


Рис. 4. Конечно-элементная модель

На базе геометрических моделей разрабатывались конечные элементы, которые включают срединные узлы. Также, в модели входят такие элементы как: гексаэдральные и тетраэдральные. Каждый равняется 6 мм.

Необходимо рассмотреть, какие величины нагрузок использовались в процессе:

Для балок 40Б1х40К1 (по СТО АСЧМ),  $N = 264779,55Н$ .

Параметры нагружения, направление нагрузки, точки фиксации изображены на рис. 5.

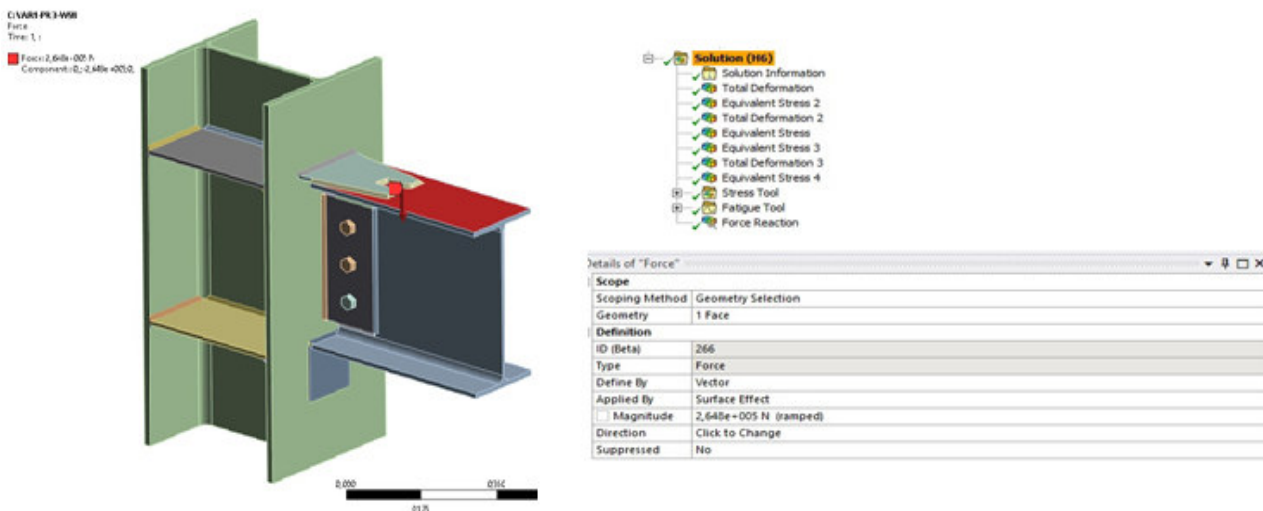


Рис. 5. Параметры нагружения

Для исследования влияния остаточных сварочных напряжений в узлах предварительно решается тепловая задача, в которой определяется поле температуры в деталях после формирования сварных швов (используется допущение при мгновенном выполнении швов). Затем поле температур импортируется в прочностную задачу и на первом шаге нагружения прикладывается к деталям. В результате расчета в материале вблизи

сварных швов появляются пластические деформации, на втором шаге нагружения поле температур снимается и прикладывается основная нагрузка.

В расчете используется нелинейная модель материала, свойства материала показаны на рис. 6.

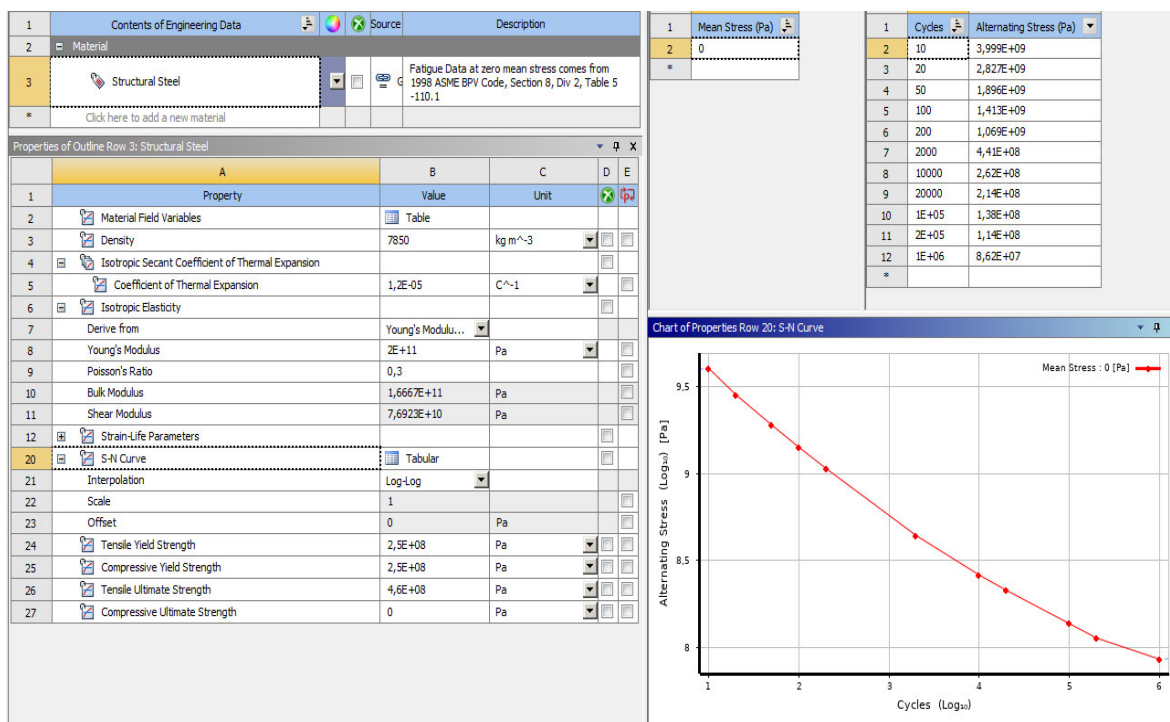


Рис. 6. Свойства материала

**Результаты моделирования образцов сечением 40×40 (усиление с помощью накладки)**

**а – Размер профиля – 40×40 (по СТО АСЧМ), катет сварного шва – 10 мм.**

**1. Расчет перемещений**

Определение величины суммарных перемещений в элементах рамного узла и анализ их изменения в сочетании с величинами эквивалентных напряжений позволяет более полно характеризовать наступление предельного состояния при динамических воздействиях [15].

В случае повторно-статического нагружения показатель на рис. 7 равняется 1,43 мм.

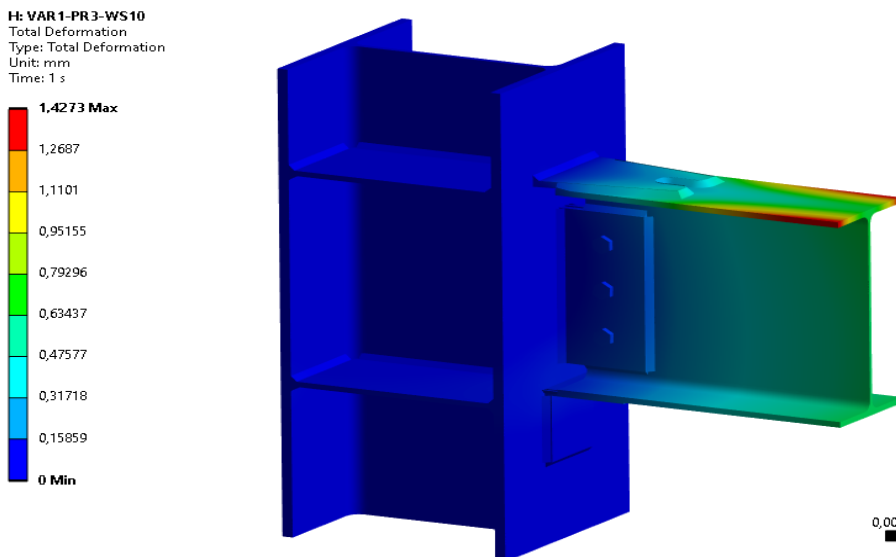


Рис. 7. Общие перемещения

**2. Определение эквивалентных напряжений по Мизесу**

Для большинства материалов напряжение сжатия не приводит к необратимым изменениям форм и размеров. По этой причине придерживаются мнения, что при пластичности действует функция инвариантов девиатора.

Из большого количества условий пластичности целесообразно использовать условия Мизеса и Треска, которые являются наиболее простыми и при этом дают точные результаты.

Наибольшие напряжения балки в случае приложения повторно-статических нагрузок на рис. 8 составляют 288,63 МПа и отмечены в нижнем углу усиления.

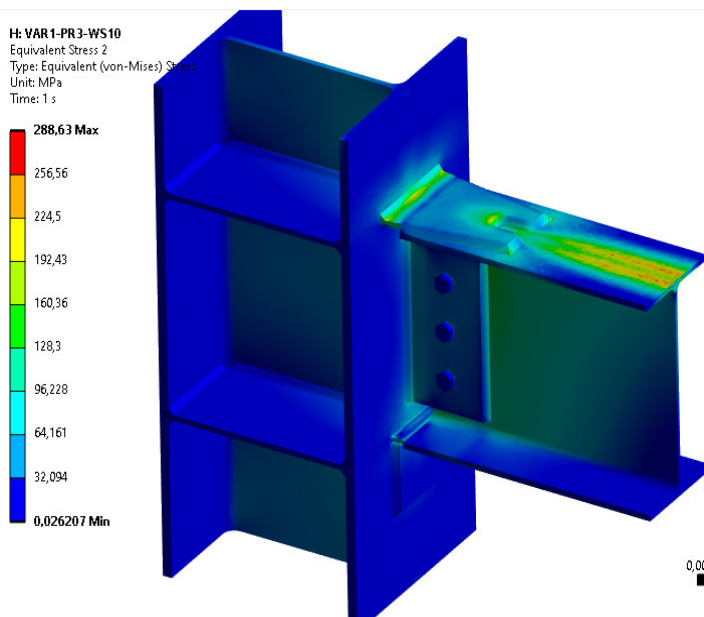


Рис. 8. Эквивалентные напряжения по Мизесу

На рис. 9. представлены показатели запаса прочности в швах деталей усиления. Наибольшая концентрация напряжений в сварных швах возникает в местах соединения деталей усиления с вертикальной опорой. Минимальный коэффициент запаса прочности в сварных швах верхней и

нижней деталей усиления при заданном пределе текучести материала составляет 0,87. В тех местах, где коэффициент меньше 1, после приложения нагрузки возникают пластические деформации, в остальных местах – деформации упругие.

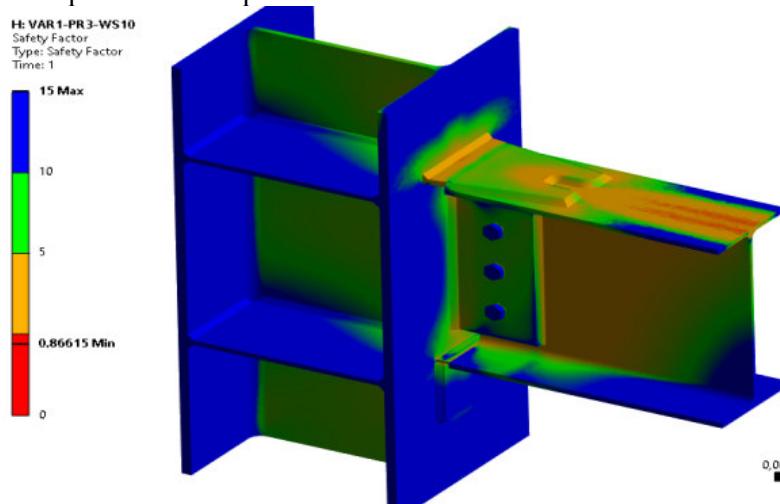


Рис. 9. Коэффициент запаса прочности

### 3. Расчет количества циклов до разрушения

Наименьшее число циклов до полного разрушения в случае симметричного нагружения на рис. 10 равняется 7414 циклам. Явление усталости отмечается на уголках, расположенных в верхней и нижней части узла.

На рис. 11 представлена расчетная долговечность в сварных зонах деталей усиления. Сила реакции в закреплениях вертикальной балке равна  $2,648e+005$  Н..

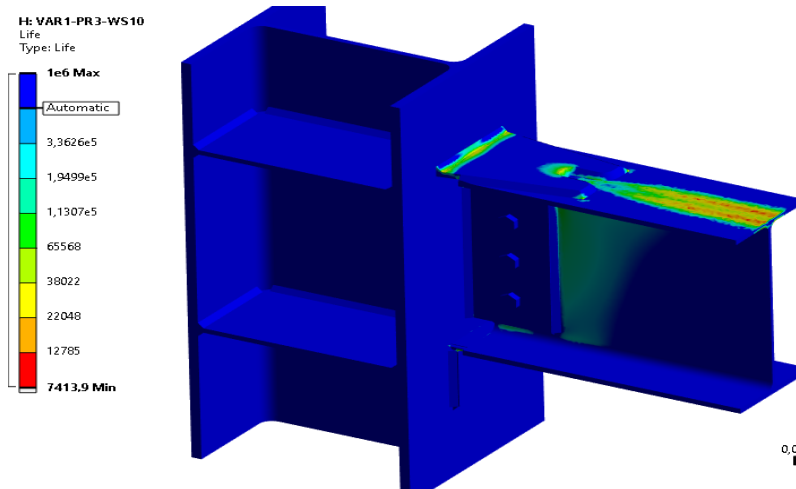


Рис. 10. Количество циклов до разрушения

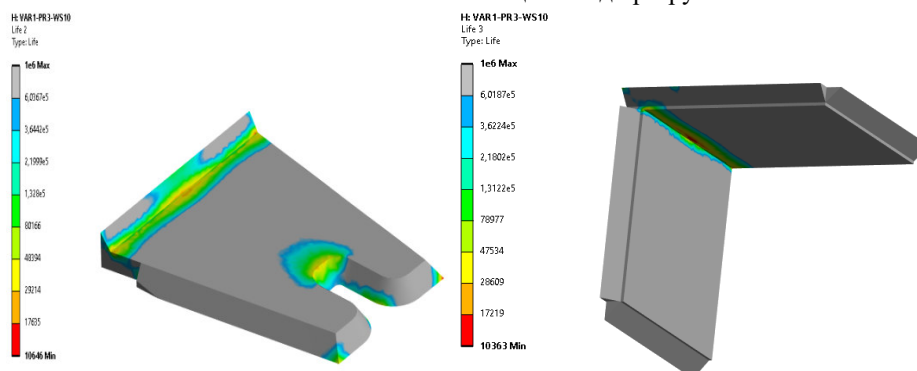


Рис. 11. Расчетная долговечность в сварных зонах деталей усиления



**Б – Размер профиля – 40×40(по СТО АСЧМ), катет сварного шва – 12 мм.** В случае повторно-статического нагружения показатель

на рис.12 равняется 1,97 мм. Наибольшие напряжения в балке при повторно-статической нагрузке, приведенные на рис. 13, составляют 422,3 МПа и отмечены в нижнем углу усиления.

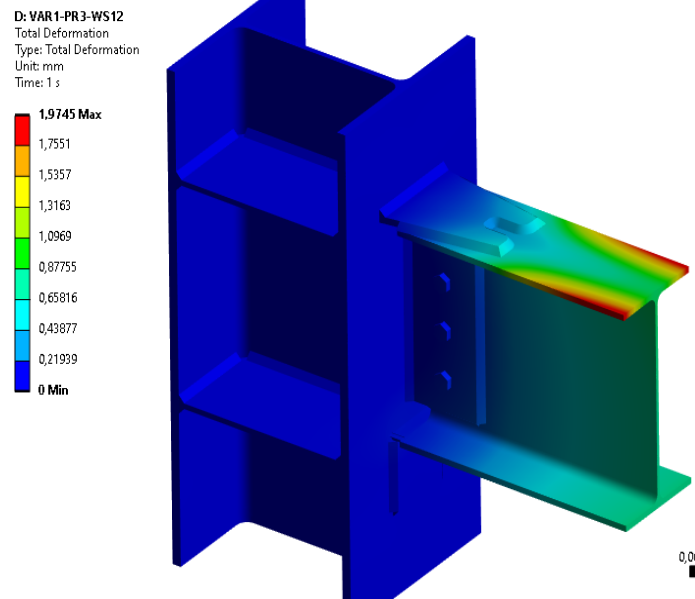


Рис. 12. Общие перемещения

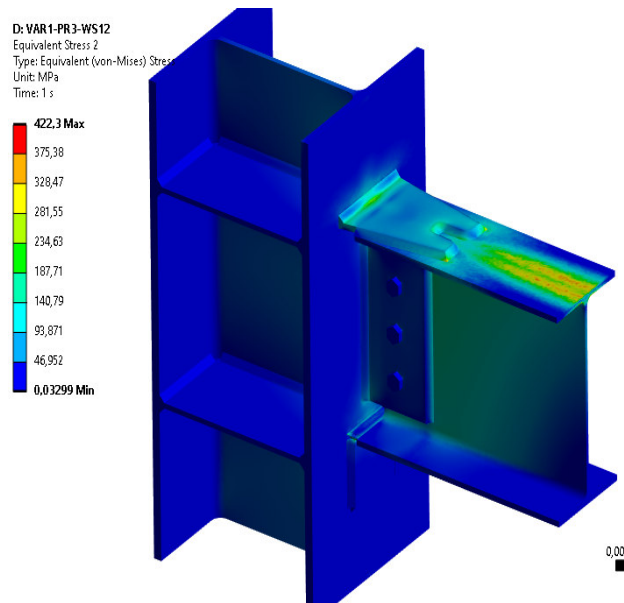


Рис. 13. Эквивалентные напряжения по Мизесу

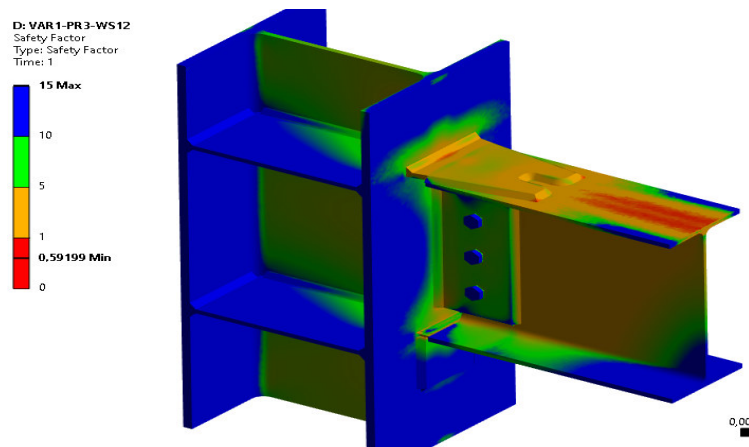


Рис. 14. Коэффициент запаса прочности

На рис. 14. приведены показатели запаса прочности в швах деталей усиления. Наибольшая концентрация напряжений в сварных швах возникает в местах соединения деталей усиления с вертикальной опорой. Минимальный коэффициент запаса прочности в сварных швах верхней и

нижней деталей усиления при заданном пределе текучести материала составляет 0,59. В тех местах, где коэффициент меньше 1, после приложения нагрузки возникают пластические деформации, в остальных местах – деформации упругие.

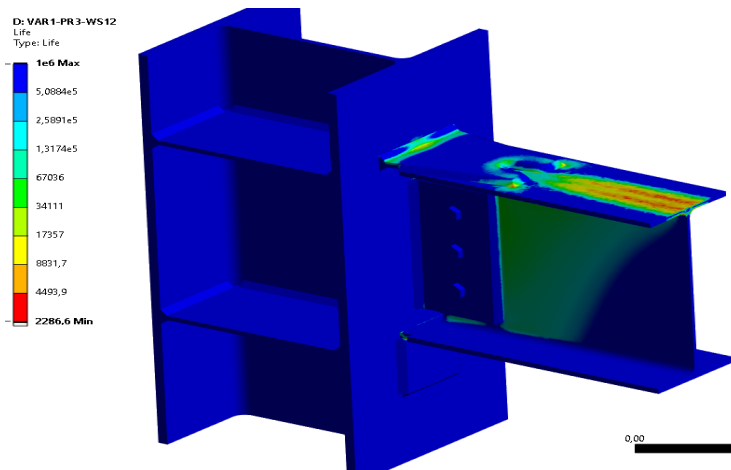


Рис. 15. Количество циклов до разрушения

Наименьшее число циклов до полного разрушения в случае симметричного нагружения, приведенное на рис. 15, равняется 2287 циклам. Явление усталости отмечается на уголках, расположенных в верхней и нижней части узла.

На рис. 16 представлена расчетная долговечность в сварных зонах деталей усиления.

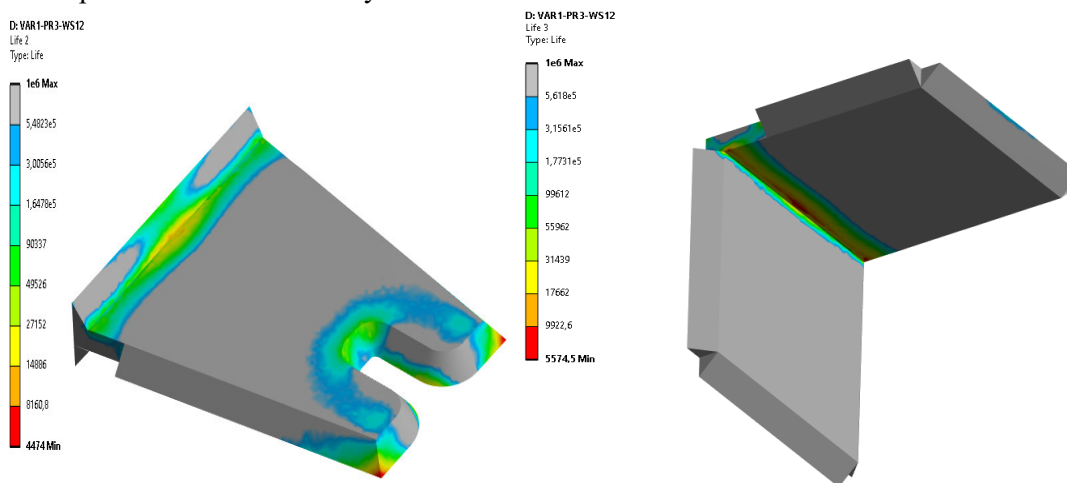


Рис. 16. Расчетная долговечность в сварных зонах деталей усиления

Сила реакции в закреплениях вертикальной балки равна  $2,648e+005$  Н.

**Обсуждение.** По результатам расчётов можно сделать следующие выводы.

Образцы с наименьшими катетами сварных швов менее подвержены разрушению и способны выдержать большее число циклов.

Можно предположить, что величина катетов сварных швов и соответствующие им величины остаточных сварочных напряжений оказывают существенное влияние на усталостную прочность усиливаемого узла.

В таблице 1 предоставлен общий анализ результатов моделирования.

Таблица 1

**Общий анализ результатов моделирования**

Вариант сечения	Нагрузка, Н	Катет шва, мм	Количество циклов до разрушения	Общие перемещения, мм	Эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа
40Б1×40 К1	264779,55	10	7414	1,43	288,63
		12	2287	1,97	422,3

**Выводы.** На базе подробного анализа итогов моделирования удалось определить, что прочность соединений обуславливается высотой катета швов, что подтверждает влияние остаточных сварочных напряжений на прочность соединений при динамических нагрузках. Это также подтверждается числом циклов до разрушения.

Можно рекомендовать, при проектировании необходимо использовать размеры катетов сварных швов минимально допустимые по действующим нормам СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции актуализированная редакция СНиП II-23-81».

Кроме того, используя метод усиления металлоконструкций при помощи наращивания сечений, следует рекомендовать к применению сварные швы малых катетов, а при недостаточной площади сварного соединения при уменьшенном катете – увеличивать длину сварных швов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Форрест П. Усталость металлов. М.: Машиностроение, 1968. 354 с.
2. Берендеев Н.Н. Сопротивление усталости. Основы. Учебно-методическое. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2010. 65 с.
3. Абсиметов В.Э. Дефекты монтажа, методы устранения надёжность и долговечность строительных конструкций. Белгород: Изд-во БГТУ, 2021. 222с.
4. Пичугин С.Ф. Надёжность стальных конструкций производственных зданий. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2011. 455 с.
5. Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э., Проблемы оценки надёжности металлических конструкций // Сборник докладов VI Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры строительства и городского хозяйства. Том 1. Белгород, 2022. С. 9–14.
6. Аль-Сабаеи А.К., Усиление узлов опирания и сопряжения строительных металлоконструкции // V Международный студенческий строительный форум-2020. Сборник докладов. В 2-х томах. Том 1. Белгород, 2020. С. 23–30.
7. Huei-Huang L. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench: SDC Publications, 2023. 600 p.
8. Саченков О.А., Саченков А.А., Большаков П.В., Герасимов О.В., Автоматизированное моделирование и расчёт конструкций в ANSYS: одномерные модели. Казань: Казан. ун-т, 2019. 140 с.
9. Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в Ansys Workbench: Учеб.-метод. пособие для студентов естественно-научных дисциплин. Саратов: Амрит, 2016. 56 с.
10. Конюхов А. В. Основы анализа конструкций в Ansys: учебное пособие. Казань: КГУ, 2001. 102 с
11. Belen'kii D.M., Vernezi N.L., Cherpakov A.V. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. Welding International. 2004. No. 18. Pp. 213–215.
12. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надёжность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
13. Шпете Г. Надёжность несущих строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1994. 288 с.
14. Абсиметов В.Э. Проектирование стальных конструкций с применением Еврокодов [EN 1993] примеры расчета. Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. 142 с.
15. Довнар Е.П., Климова Л.Б. Расчет рам на статические и динамические нагрузки. Мн.: БНТУ, 2004. 186 с.

#### Информация об авторах

**Аль-Сабаеи Арафат Касем**, ассистент кафедры строительства и городского хозяйств. E-mail: kasem90@bk.ru . Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

**Абсиметов Владимир Эскендерович**, доктор технических наук, профессор кафедры строительства и городского хозяйств. E-mail: absimetov57@mail.ru. Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д.46.

---

Поступила 05.02.2024 г.

© Аль-Сабаеи А.К., Абсиметов В.Э., 2024



*\*Al-Sabaei A.Q., Absimetov V.E*  
*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*  
*\*E-mail: kacem90@bk.ru*

## CALCULATION OF STRESS-STRAIN STATE (SSS) FOR FRAME ASSEMBLIES OF BUILDING METAL STRUCTURES WHEN THEY ARE REINFORCED

**Abstract.** Experience in the operation of reinforced metal structures of industrial buildings has shown that under increased influence of static loads, units of frame elements rarely fail, which cannot be noted in the case of prolonged application of dynamic loads. As a rule, welded joints of fastenings of reinforcement elements are subject to destruction, which is the reason for conducting this study. During the work, the influence of residual welding stresses on the durability of reinforced frame assemblies under the influence of dynamic loads was revealed. The numerical modeling method was used using the Ansys SpaceClaim software package. The vibration strength of seams is determined by the height of the leg of welded joints associated with the transition of the material to the stage of deformation and displacement of structural units subjected to cyclic loading. It should be noted that fatigue failure is divided into two categories: high-cycle fatigue and low-cycle fatigue. High-cycle fatigue, when the number of cycles of load application is large (around  $1e^4 - 1e^9$ ). With this formulation, the stress level is usually lower in comparison with the ultimate strength of the material. Durability assessment, depending on the stress level, is usually used to calculate high-cycle fatigue. Low-cycle fatigue, when the number of cycles of the applied load is relatively small. Plastic deformation is often associated with low cycle fatigue calculations and results in reduced fatigue life. Assessment of durability depending on the level of deformation is more applicable to the calculation of low-cycle fatigue.

**Keywords:** metal structures, frame assemblies, durability, multi-cycle fatigue, residual welding stresses, reinforcements.

### REFERENCES

1. Forrest P. Fatigue of metals [Ustalost' metallov]. M.: Mashinostroenie, 1968. 354 p. (rus)
2. Berendeev N.N., Fatigue resistance. The basics. Educational and methodical [Soprotivlenie ustalosti. Osnovy. Uchebno-metodicheskoe]. N. Novgorod: Nizhny Novgorod State University, 2010. 65 p. (rus)
3. Absimetov V.E. Installation defects, methods of elimination reliability and durability of building structures: monograph. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2021. 222 p. (rus)
4. Pichugin S.F. Reliability of steel structures of industrial buildings [Nadezhnost' stal'nykh konstrukcij proizvodstvennykh zdaniy]. Moscow: Publishing house of the Association of Civil Engineering Universities, 2011. 455 p. (rus)
5. Al-Sabaei A.K., Absimetov V.E., Problems of assessing the reliability of metal structures [Problemy ocenki nadezhnosti metallicheskih konstrukcij]. Collection of reports of the VI International Scientific and practical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of Construction and Urban Management. Vol 1. Belgorod, 2022. Pp. 9–14. (rus)
6. Al-Sabaei A.K., Reinforcement of support and coupling nodes of building metal structures [Usilenie uzlov opiraniya i sopryazheniya stroitel'nykh metallokonstrukcii]. V International Student Construction Forum 2020. Collection of reports. In 2 Vol. Vol 1. Belgorod, 2020. Pp. 23–30. (rus)
7. Huei-Huang L. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench: SDC Publications, 2023. 600 p.
8. Sachenkov O.A., Sachenkov A.A., Bolshakov P.V., Gerasimov O.V., Automated modeling and calculation of structures in ANSYS: one-dimensional models: textbook. Manual. Kazan: Kazan. Univ., 2019. 140 p. (rus)
9. Ivanov D.V., Dol A.V. Introduction to Ansys Workbench: Study method. a manual for students of natural sciences. Saratov: Amirit, 2016. 56 p. (rus)
10. Konyukhov A.V. Fundamentals of structural analysis in Ansys: textbook. Kazan: KSU, 2001. 102 p. (rus)
11. Belen'kii D.M., Vernezi N.L., Cherpakov A.V. Changes in the mechanical properties of butt welded joints in elastoplastic deformation. Welding International. 2004. No. 18. Pp. 213–215.
12. Rzhantsyn A.R. Theory of calculation of building structures for reliability [Teoriya rascheta stroitel'nykh konstrukcij na nadezhnost']. M.: Stroyizdat, 1978. 239 p. (rus)
13. Shpete G. Reliability of load-bearing building structures [Nadezhnost' nesushchih stroitel'nykh konstrukcij]. M.: Stroyizdat, 1994. 288 p. (rus)
14. Absimetov V.E. Design of steel structures using Eurocodes [EN 1993] calculation examples: monograph. Belgorod: Publishing House of BSTU, 2023. 142p. (rus)
15. Dovnar E.P. Calculation of frames for static and dynamic loads: Textbook. E.P. Dovnar, L.B. Klimova. Mn.: BNTU, 2004. 186 p. (rus)

*Information about the author*

**Al-Sabaeei, Arafat Q.** Assistant. E-mail: kacem90@bk.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Absimetov, Vladimir E.** DSc, Professor. E-mail: absimetov57@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 05.02.2024*

**Для цитирования:**

Аль-Сабееи А.К., Абсиметов В.Э. Расчет НДС рамных узлов строительных металлоконструкции при их усилении // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №4. С. 26–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-26-35

**For citation:**

Al-Sabaeei A.Q., Absimetov V.E. Calculation of stress-strain state (SSS) for frame assemblies of building metal structures when they are reinforced. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 4. Pp. 26–35. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-4-26-35