

На правах рукописи



МАТВЕЕВ Егор Андреевич

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ДЕФЕКТАМИ И
ПОВРЕЖДЕНИЯМИ**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: **Белый Григорий Иванович**,
доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: **Ибрагимов Александр Майорович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет», кафедра металлических
и деревянных конструкций, профессор;

Веселов Виталий Владиславович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Петербургский
государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»,
кафедра «Строительные конструкции,
здания и сооружения», доцент.

Ведущая организация: **АО «ЦНИИПромзданий».**

Защита диссертации состоится «02» декабря 2026 года в 13.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, аудитория 220, тел./факс: (812) 316-58-73.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/matveev-egor-andreevich>

Автореферат разослан «26» октября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Попов В. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Техническое перевооружение и реконструкция действующих предприятий, широко проводимые в настоящее время, основаны на оценке технического состояния эксплуатируемых строительных конструкций зданий и сооружений. Стальные конструкции, как известно, являются достаточно чувствительными к дефектам и повреждениям, приобретённым в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации, которые в сочетании с возможной коррозией металла значительно ускоряют физический износ, приводя их к ограниченно-работоспособному состоянию или к эксплуатационной непригодности. Анализ результатов обследования показал, что до 20 % металлических конструкций имеют искривления оси элемента, коррозионные повреждения, местные погиби и вырезы частей сечения.

В методах расчета существующих нормативных документов не учитывается влияние дефектов и повреждений на несущую способность элементов стальных конструкций, а имеющиеся рекомендации в пособии по проектированию их усилия в большей степени относятся к оценке технического состояния эксплуатируемых конструкций покрытий из спаренных уголков. Указанные рекомендации не могут быть распространены на другие типы поперечных сечений и в значительной степени не охватывают весь комплекс факторов, которые могут оказать существенное влияние на несущую способность элементов и конструкций в целом.

Достоверная оценка прочности и устойчивости эксплуатируемых стальных конструкций может быть получена на основе разработанного быстродействующего расчётного аппарата, который дал бы возможность достаточно обосновано выявлять фрагменты конструкций и (или) их элементов, нуждающихся в немедленном усилении, и элементы с потенциально неопасными дефектами и повреждениями. Учитывая изложенное, тема диссертации является *актуальной*.

Целью диссертационной работы является исследование особенностей влияния наиболее распространённых дефектов и повреждений на несущую способность сплошностенчатых стержневых элементов стальных конструкций и разработка метода их расчета.

В рамках исследования были определены следующие задачи:

1. Адаптировать «обратные» численный и численно-аналитический методы на расчет несущей способности сплошностенчатых элементов стальных конструкций с наиболее распространёнными дефектами и повреждениями и установить закономерности влияния их параметров и места расположения на прочность и общую устойчивость.

2. С целью унификации решения свести параметры механических и коррозионных повреждений, вызывающих потерю местной устойчивости, к эквивалентному ослаблению сечения в виде выреза.

3. Выявить зависимости несущей способности стальных элементов от величины и места расположения повреждения, величины и направления начального искривления оси относительно параметров загрузки.

4. Выполнить экспериментальное исследование влияния обобщенного локального повреждения в виде выреза на устойчивость двутаврового элемента.

5. Разработать гармонизированный с действующими нормами проектирования практический метод расчета элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями на прочность и общую устойчивость.

Научная гипотеза исследования состоит в том, что развитие и распространение «обратных» численного и численно-аналитического методов применительно к расчету стальных сплошностенчатых стержневых элементов с дефектами и повреждениями, вызывающими при любом виде загрузки возникновение в сечении дополнительных усилий, позволит выявить и охарактеризовать зависимости влияния параметров дефектов и повреждений на прочность и общую устойчивость.

Объект исследования – сплошностенчатый стержневой элемент стальных конструкций с дефектами и повреждениями.

Предмет исследования – параметры прочности и устойчивости элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями.

Научная новизна исследований.

1. Доказана применимость и выполнена адаптация «обратных» численного и численно-аналитического методов расчёта прочности и общей устойчивости применительно к элементам стальных конструкций с дефектами и повреждениями.

2. Установлены зависимости снижения несущей способности стальных элементов от величины и места расположения повреждения, величины и направления начального искривления оси относительно параметров загрузки.

3. Выявлена закономерность снижения общей устойчивости от степени общего коррозионного повреждения, с учетом потери местной устойчивости утоненных элементов сечения.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанные автором методы расчета элементов стальных конструкций, дают возможность с достаточной степенью точности установить зависимости прочности и устойчивости от параметров и места

расположения дефектов и повреждений, что позволяет более обосновано оценивать техническое состояние эксплуатируемых стальных конструкций.

Практическая значимость работы заключается в возможном применении предложенного метода расчета на прочность и общую устойчивость эксплуатируемых элементов стальных конструкций, в котором влияние повреждений компенсируется дополнительным догрузением фиктивными силами.

Методология и методы исследования. Методологическую основу диссертационного исследования составляют положения деформационной теории расчета упругих стержней, «обратные» численный и численно-аналитический методы, а также апробированный алгоритм «сечение», отличительной особенностью которого является учет физической нелинейности материала и ослаблений, и метод упругих решений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Адаптированные «обратные» численный и численно-аналитический методы на расчет прочности и общей устойчивости элементов стальных конструкций с наиболее распространенными дефектами и (или) повреждениями, влияние которых при любом нагружении стимулирует возникновение в сечении дополнительных усилий.

2. Зависимости снижения несущей способности стальных элементов от величины и места расположения повреждения, величины и направления начального искривления оси относительно параметров нагружения.

3. Результаты экспериментального исследования влияния обобщенного локального повреждения в виде выреза на устойчивость двутаврового элемента.

4. Практический метод расчета на прочность и общую устойчивость элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями, гармонизированный с действующими нормами проектирования.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК – 2.1.1. «Строительные конструкции, здания и сооружения», пункт 1 «Построение и развитие теории, разработка аналитических и вычислительных методов расчёта механической безопасности и огнестойкости, рационального проектирования и оптимизации конструкций и конструктивных систем зданий, и сооружений».

Достоверность результатов обоснована применением общепринятых расчетных допущений, включающих теорию деформационного расчета упругих стержней и стандартные модели поведения упругопластических материалов; обеспечена хорошим согласованием результатов расчета на основе разработанных методов с результатами известных решений частных задач, а также хорошей сходимостью теоретических выводов с

экспериментальными результатами, полученными при выполнении диссертационной работы.

Апробация результатов исследования. Основные выводы и результаты диссертационной работы были представлены на международных и всероссийских конференциях и конкурсах:

1. LXXXVI Региональная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.).

2. 81-ой Всероссийская научно-техническая конференция «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии» (г. Самара, 2024 г.).

3. XII Молодежная международная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность» (г. Москва, 2024 г.).

4. LXXVII Национальная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Санкт-Петербург, 2024 г.).

5. LXXIX Международная научно-практическая конференция «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика» (г. Санкт-Петербург, 2025 г.).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в 5 печатных работах, в том числе 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы используются ООО «Научно-исследовательский и проектный институт «Эксплуатационный ресурс конструкций» (ООО «НИПИ «ЭРКОН»») (г. Санкт-Петербург) при проведении реконструкции и техническом перевооружении действующих предприятий.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы – 122 страницы машинописного текста, включая 8 таблиц, 52 рисунков и 61 формулу. Список литературы содержит 133 наименований, в том числе 24 – на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, проведен анализ степени изученности данного направления, определена цель и задачи исследования, сформулирована научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость, представлена информация по апробации положений, выносимых на защиту и количеству публикаций.

В первой главе рассмотрены типы наиболее распространённых дефектов и повреждений эксплуатируемых стальных конструкций, а также приведен краткий обзор экспериментальных и теоретических исследований прочности и устойчивости сплошностеччатых элементов стальных конструкций с дефектами и повреждениями.

На основании работ Л. Эйлера, Ф. Энгессера, Ф.С. Ясинского, Б.Г. Галеркина, И.Г. Бубнова, Т. Кармана, Ф. Шенли, С.П. Тимошенко, А.В. Геммерлинга, А.Р. Ржаницына, Н.С. Стрелецкого, Е.И. Белени, Г.Е. Бельского, Б.И. Любарова, Н.Л. Чернова, А.А. Потапкина, В.И. Сердюкова, Б.М. Броуде, Л.И. Воробьева, Е.А. Бейлина, В.Д. Насонкина, П.Я. Ларичева, Ю.Д. Копейкина, А.З. Зарифьяна, Г.М. Чувикина, Н.Н. Родикова и Г.И. Белого изложены основные методы проверки прочности и общей устойчивости сплошностенчатых элементов стальных конструкций. Среди зарубежных авторов следует отметить C. Birnstiel, I. Michalos, A. Harstead, C. Birnstiel, S.T. Graves, L.T. Cheney, K. Leu, W. F. Chen и T. Atsuta.

Проанализированы результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния дефектов и повреждений на несущую способность стальных конструкций, проведенных в работах М.Д. Корчака, А.Ю. Чижевского, Э.П. Хороженовой, А.И. Титакова, Ю.Н. Синицина, Н.М. Любимова, Н.Т. Чернышева, А.А. Опланчука, А.В. Ильяшенко, Н.Г. Сотникова, Е.М. Мункоевой, Л.К.С. Эдо, Э.Б. Кацеф, П.А. Пяткина, М.В. Асташкина, A. Neut, S.E. Swensen, H.P. Lee и P.J. Harris.

Сделан вывод, что методы расчета, приведенные в действующих нормативных документах, не учитывают влияние дефектов и повреждений на прочность и устойчивость элементов стальных конструкций, а имеющиеся рекомендации в пособии по проектированию их усиления в большей степени относятся к элементам эксплуатируемых конструкций покрытий из спаренных уголков. Указанные рекомендации не могут быть распространены на другие типы поперечных сечений и в значительной степени не охватывают весь комплекс факторов, которые могут оказать существенное влияние на несущую способность элементов стальных конструкций.

На основании анализа научных материалов сделан вывод о необходимости разработки методов расчета на прочность и общую устойчивость стальных эксплуатируемых элементов с дефектами и повреждениями. Для этого следует адаптировать «обратные» численный и численно-аналитический методы применительно к элементам эксплуатируемых стальных конструкций с дефектами и повреждениями, что позволит получить необходимый массив данных для построения практических расчётных методов оценки прочности и устойчивости.

Во второй главе изложен метод расчёта прочности элементов стальных конструкций, имеющих наиболее распространённые дефекты и повреждения с учетом взаимного влияния усилий на развитие пластических деформаций, основанный на обратном численном методе, разработанном Г.И. Белым. С целью унификации решения предложен способ приведения разных типов повреждений (местные погиби элементов сечения, коррозия, приводящая к потере местной устойчивости, а также вырывы, истирания и др.) к эквивалентному ослаблению в виде выреза.

Коррозионное повреждение, вызывающее уменьшение толщины стенки и поясов на Δ_w , Δ_f ($t_w^* = t_w - \Delta_w$, $t_f^* = t_f - \Delta_f$), приводит к увеличению их условных гибкостей $\bar{\lambda}_w^*$ и $\bar{\lambda}_f^*$, которые превышают предельные значения $\bar{\lambda}_u = f(\bar{\varepsilon}_l, \alpha)$, установленные в табл. 21 СП 294.1325800.2017, что вызывает потерю устойчивости сжатого пояса и стенки. Наиболее нагруженная сжатая часть ширины любой пластинки, выходящая за рамки определяемой ею предельной гибкости, является нерабочей и считается ослаблением. Это позволяет перейти от запредельного состояния пластинки к её ослаблению (редукции).

Ширину участка пластины, который выключается из работы и считается ослаблением определяем по формуле:

$$b_{loc} = b_{ef} (1 - \bar{\lambda}_u / \bar{\lambda}), \quad (1)$$

где $\bar{\lambda} = (b_{ef} / t^*) \sqrt{R_y / E}$ – условная гибкость пластины, поврежденной коррозией; b_{ef} – ширина свеса; t^* – толщина пластины, поврежденной коррозией; $\bar{\lambda}_u$ – предельная условная гибкость пластины.

Местные погиби элементов, составляющих поперечное сечение с параметром f_0 приводятся к эквивалентному вырезу с параметром b_{loc} . На первом этапе производится замена искривлённого участка пластины (пояса) на прямолинейный с переменной толщиной t_p .

$$t_p = \frac{t^3}{t^2 + 3,4 \cdot f_0^2 \cdot (z / b_{ef})^4}, \quad (2)$$

где t – фактическая толщина элемента; f_0 – стрелка погиби; z – расстояние от начала свеса.

На втором этапе осуществляется переход от пояса с переменной толщиной к красвому вырезу. Ширина эквивалентного красвого выреза определяем по формуле:

$$b_{loc} = b_{ef} (1 - \bar{\lambda}_u / \bar{\lambda}_p), \quad (3)$$

где $\bar{\lambda}_p = (b_{ef}/t_p)\sqrt{R_y/E}$ – условная гибкость пластины переменной толщины.

Влияние обобщенного повреждения рассмотрено на наиболее распространенном в практике стального строительства элементе двутаврового сечения при общем его загрузении с ослаблениями стенки и пояса (см. рисунок 1б), которые нарушают его симметрию и вызывают смещение центра тяжести, что приводит к возникновению в сечении дополнительных усилий и усложняет решение задачи прочности. Учитывая последнее исследование будет производится как для неослабленного сечения с дополнительным догрузением элемента фиктивными усилиями, компенсирующими данные ослабления. Предельное деформированное состояние по прочности задается критерием полной предельной деформации наиболее напряженного волокна ($\bar{\varepsilon}_{\max} = \bar{\varepsilon}_{\lim,p} + 1 = 4$) в сечении упругого стального двутаврового элемента, которое определяется при действии «упругих» предельных усилий (см. рисунок 1а): продольной силы N^* и изгибающих моментов M_x^* и M_y^* , действующих в двух главных плоскостях.

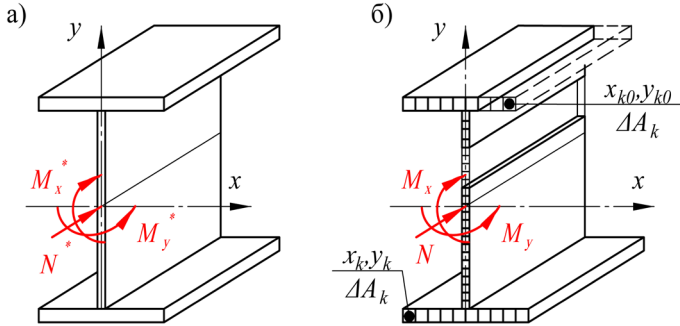


Рисунок 1 – Схема действующих усилий в элементе: а) полное сечение; б) поврежденное сечение

В целях обобщения, решение проводится в безразмерных параметрах, в котором за общий параметр загрузки принимается коэффициент продольной силы $\varphi^* = N^*/R_y A$. Тогда предельное деформированное $\bar{\varepsilon}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varepsilon^*(\bar{x}, \bar{y}) E / R_y$ и напряженное состояние $\bar{\sigma}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \sigma^*(\bar{x}, \bar{y}) E / R_y$ при упругой работе материала получают один вид:

$$\bar{\varepsilon}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \bar{\sigma}^*(\bar{x}, \bar{y}) = \varphi^* (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x}), \quad (4)$$

где $\varphi^* = \bar{\varepsilon}_{\max} \cdot (1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x})^{-1}$; $\bar{\varepsilon}_{\max} = 4$; $m_x^* = e_y^* / \rho_x (e_y^* = M_x^* / N^*)$,

$m_y^* = e_x^* / \rho_y$ ($e_x^* = M_y^* / N^*$) – относительные эксцентриситеты продольной силы; $\rho_x = W_{x,c} / A$, $\rho_y = W_{y,c} / A$ – ядровые расстояния; $\bar{x} = x / x_*$, $\bar{y} = y / y_*$ – относительные координаты волокон.

Для реализации численного решения полное сечение элемента разбивается на n , а ослабления на n_b достаточно малых дискретных площадок ΔA_k с координатами центра тяжести x_k, y_k и x_{ko}, y_{ko} соответственно (см. рисунок 1б).

Используя гипотезу плоских сечений относительные деформации любого k -ого волокна можно представить в виде:

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{\varepsilon}_0 - \bar{v}'' \cdot \tilde{y}_k - \bar{u}'' \cdot \tilde{x}_k, \quad (5)$$

где $\bar{\varepsilon}_0 = \varepsilon_0 E / R_y = \varphi^*$ – приведенная относительная деформация оси стержня с неослабленным сечением; $\bar{v}'' = v'' \rho_x E / R_y = -\varphi^* m_x^*$ и $\bar{u}'' = u'' \rho_y E / R_y = -\varphi^* m_y^*$ – безразмерные параметры кривизн оси элемента; v , u – перемещения относительно осей x и y соответственно; $\tilde{x}_k = x_k / \rho_y$; $\tilde{y}_k = y_k / \rho_x$ – относительные координаты центра тяжести k -ой дискретной площадки.

Тогда, используя (5) и унифицированную диаграмму работы стали с физическим пределом текучести $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$ (см. рисунок 2) с помощью алгоритма «сечение» определим предельные параметры усилий, соответствующих заданному деформированному состоянию (4):

$$\left. \begin{aligned} \varphi^{oc} &= \varphi^* \left(\bar{A}_{ef} - m_x^* (\rho_x / y_*) \bar{S}_x - m_y^* (\rho_y / x_*) \bar{S}_y \right); \\ m_x^{oc} &= (\varphi^* / \varphi^{oc}) \cdot \left(-\bar{S}_x + m_x^* (\rho_x / y_*) \bar{I}_{x,ef} - m_y^* (\rho_y / x_*) \bar{I}_{xy,ef} \right); \\ m_y^{oc} &= (\varphi^* / \varphi^{oc}) \cdot \left(-\bar{S}_y - m_x^* (\rho_x / y_*) \bar{I}_{xy,ef} + m_y^* (\rho_y / x_*) \bar{I}_{y,ef} \right). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \bar{A}_{ef} &= 1 - \bar{A}_{pl} - \bar{A}_{loc}; \bar{A}_{pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \Delta \bar{A}_k; \bar{A}_{loc} = \sum_{k=1}^{n_b} \bar{E}_{ck} \Delta \bar{A}_k; \\ \bar{S}_{x(y)} &= \bar{S}_{x(y),pl} + \bar{S}_{x(y),loc}; \bar{S}_{x,pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k; \bar{S}_{y,pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \Delta \bar{A}_k; \\ \bar{S}_{x,loc} &= \sum_{k=1}^{n_b} \bar{E}_{ck} \tilde{y}_{k0} \Delta \bar{A}_k; \bar{I}_{x(y),ef} = I_{x(y)} / \left(\rho_{x(y)}^2 A \right) - \bar{I}_{x(y),pl} - \bar{I}_{x(y),loc}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_{xy,ef} &= \bar{I}_{xy,pl} + \bar{I}_{xy,loc}; \bar{I}_{x,pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{y}_k^2 \Delta \bar{A}_k; \bar{I}_{y,pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k^2 \Delta \bar{A}_k; \\ \bar{I}_{x,loc} &= \sum_{k=1}^{n_g} \bar{E}_{ck} \tilde{y}_{k0}^2 \Delta \bar{A}_k; \bar{I}_{y,loc} = \sum_{k=1}^{n_g} \bar{E}_{ck} \tilde{x}_{k0}^2 \Delta \bar{A}_k; \bar{I}_{xy,pl} = \sum_{k=1}^n (1 - \bar{E}_{ck}) \tilde{x}_k \tilde{y}_k \Delta \bar{A}_k; \\ \bar{I}_{xy,loc} &= \sum_{k=1}^{n_g} \bar{E}_{ck} \tilde{x}_{k0} \tilde{y}_{k0} \Delta \bar{A}_k.\end{aligned}$$

$\bar{A}_{ef}$ – относительная рабочая площадь сечения; $\bar{A}_{pl}$, $\bar{A}_{loc}$ – площадь ослабления сечения развитием пластических деформаций и вырезом соответственно; $\bar{S}_{x(y),pl}$, $\bar{S}_{x(y),loc}$ – относительные статические моменты ослабления развитием пластических деформаций и выреза; $\bar{I}_{x(y),ef}$, $\bar{I}_{xy,ef}$ – относительные моменты инерции рабочей части сечения и центробежные моменты соответственно; $\bar{I}_{x(y),pl}$, $\bar{I}_{x(y),loc}$ – относительные моменты инерции ослабления развитием пластических деформаций и выреза; $\bar{I}_{xy,pl}$, $\bar{I}_{xy,loc}$ – центробежные моменты ослабления развитием пластических деформаций и выреза соответственно; $\Delta \bar{A}_k = \Delta A_k / A$; A – площадь неослабленного сечения; $\bar{E}_{ck} = \text{tg } \alpha_{ck}$ – относительный секущий модуль.

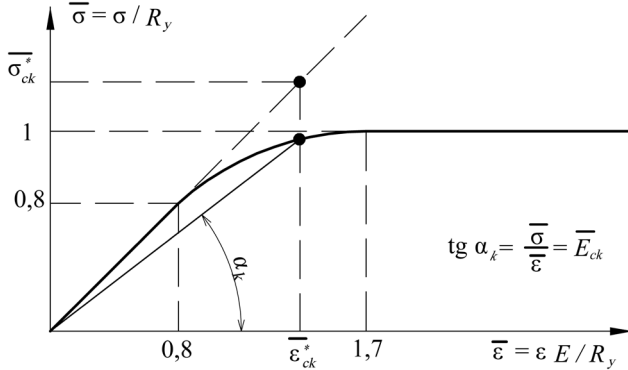


Рисунок 2 – Унифицированная диаграмма работы стали

Для неповрежденных элементов параметры φ , m_x , m_y определяются по (7), в которых относительные характеристики ослабления сечения с вырезом (индекс *loc*) равны нулю, тогда:

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi^* \left(\left(1 - \bar{A}_{pl} \right) - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{S}_{x,pl} - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{S}_{y,pl} \right); \\ m_x &= (\varphi^* / \varphi) \cdot \left(-\bar{S}_{x,pl} + m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \left[\frac{I_x}{\rho_x^2 A} - \bar{I}_{x,pl} \right] - m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \bar{I}_{xy,pl} \right); \\ m_y &= (\varphi^* / \varphi) \cdot \left(-\bar{S}_{y,pl} - m_x^* \frac{\rho_x}{y_*} \bar{I}_{xy,pl} + m_y^* \frac{\rho_y}{x_*} \left[\frac{I_y}{\rho_y^2 A} - \bar{I}_{y,pl} \right] \right). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Влияние повреждений представим коэффициентом:

$$K_{oc} = \varphi^{oc} \left(1 + m_x^{oc} + m_y^{oc} \right) \left[\varphi \left(1 + m_x + m_y \right) \right]^{-1}, \quad (8)$$

где $\varphi^{oc}, m_x^{oc}, m_y^{oc}$ – предельные параметры усилий поврежденного стержня; φ, m_x, m_y – тоже неповрежденного.

Решение обратной задачи прочности повреждённых элементов стальных конструкций в заданном сечении предполагает определение относительных эксцентриситетов продольной силы m_x и m_y . По заданным величинам m_x^* и m_y^* для конкретного деформированного состояния устанавливается соответствующее значение $\varphi^* = 4 \cdot \left(1 + m_x^* \bar{y} + m_y^* \bar{x} \right)^{-1}$, которое в сочетании с алгоритмом «сечение» позволяет получить предельные параметры усилий, фактически воспринимаемых элементом: φ^{oc}, m_x^{oc} и m_y^{oc} . Значения относительных эксцентриситетов m_x^* и m_y^* при этом задаются диапазоном, а искомые значения m_x^{oc}, m_y^{oc} и φ^{oc} находятся методом бисекции, как правило, за пять–восемь итераций, что обеспечивает практически мгновенное получение результатов.

Влияние ослабления в виде краевого выреза на прочность в зависимости от места его расположения в сечении относительно вектора действующих усилий продемонстрируем на примере расчета двутаврового элемента (см. рисунок 3).

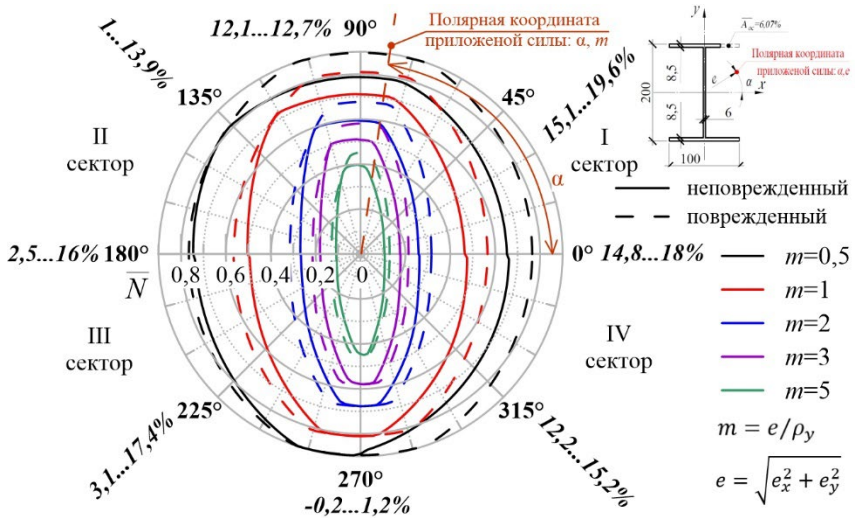


Рисунок 3 – Зависимость предельной силы от направления двухосных эксцентриситетов

Анализируя результаты, представленные на рисунке 3 можно увидеть, что повреждение пояса, составляющее 6,07%, находящееся в наиболее нагруженных зонах (сектор I и III), снижает прочность соответственно на 12,1–19,6% и 2,5–17,4%, что в 2,9–3,3 раз больше повреждения. В менее загруженных секторах II и IV, в зависимости от m_x , m_y и их соотношений, можно наблюдать, как снижение (1–15,2%), так и некоторое увеличение 0,2% прочности при малых значениях эксцентриситетов. Последнее объясняется тем, что ослабление, приводит к смещению центра тяжести сечения, уменьшая тем самым значения относительных эксцентриситетов, что в совокупности с его разгружающим действием приводит к повышению прочности. Отсюда следует, необходимость выполнения дополнительной проверки прочности по специальной комбинации расчетных усилий, составленной применительно к месту расположения повреждения.

Для удобства использования практического метода расчета на прочность поврежденных элементов используется метод расчета для неповрежденных элементов, представленный в СП 16.13330.2017, с введением дополнительного догружения фиктивными силами, компенсирующего ослабление сечения, к которому, как было отмечено ранее, сводятся механические и коррозионные повреждения. Значения фиктивных сил могут быть определены с помощью метода упругих решений по заданному загрузению N_{ef} , $M_{x,ef}$ и $M_{y,ef}$.

Определение фиктивных сил, компенсирующих повреждение пояса и стенки.

Сечение с ослаблениями пояса и стенки заменяется на неповрежденное с компенсирующим догружением фиктивными силами $N_{f,0} = \sigma_{f,0} \cdot A_{f,0}$ и $N_{w,0} = \sigma_{w,0} \cdot A_{w,0}$ (см. рисунок 4), которые определяются по фиктивным напряжениям в центре тяжести ослаблений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{f,0} &= \frac{\sigma(x_{f,0}, y_{f,0})K_2 + \sigma(0, y_{f,0})\bar{A}_{w,0}K_3}{K_1K_2 - \bar{A}_{f,0}\bar{A}_{w,0}K_3^2} \\ \sigma_{w,0} &= \frac{\sigma(0, y_{w,0})K_1 + \sigma(x_{f,0}, y_{f,0})\bar{A}_{f,0}K_3}{K_1K_2 - \bar{A}_{f,0}\bar{A}_{w,0}K_3^2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где $K_1 = 1 - \bar{A}_{f,0} \left(1 + \frac{y_{f,0}^2}{I_x^2} + \frac{x_{f,0}^2}{I_y^2} \right)$; $K_2 = 1 - \bar{A}_{w,0} \left(1 + \frac{y_{w,0}^2}{I_x^2} \right)$; $K_3 = 1 + \frac{y_{f,0}y_{w,0}}{I_x^2}$;

$\bar{A}_{f,0} = A_{f,0}/A$; $\bar{A}_{w,0} = A_{w,0}/A$;

$$\sigma(x_{f,0}, y_{f,0}) = \frac{N_{ef}}{A} + \frac{M_{x,ef}}{I_x} y_{f,0} + \frac{M_{y,ef}}{I_y} x_{f,0}; \quad \sigma(0, y_{w,0}) = \frac{N_{ef}}{A} + \frac{M_{x,ef}}{I_x} y_{w,0}.$$

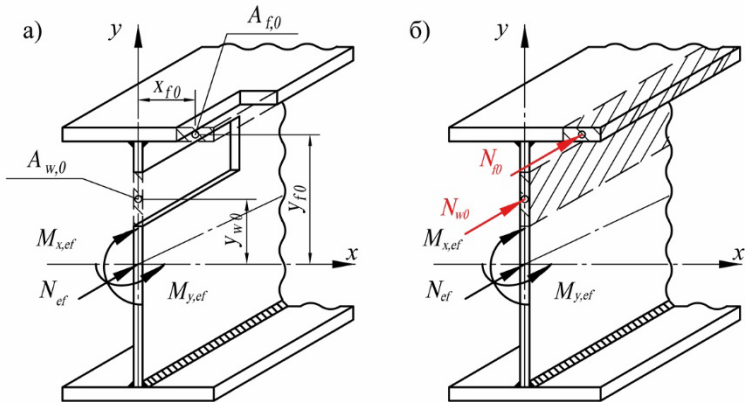


Рисунок 4 – Схема действующих усилий в элементе с: а) поврежденным сечением; б) полным сечением, догруженным фиктивными силами

Расчет на прочность поврежденных элементов при общем нагружении.

Проверку прочности при упругой работе материала можно выполнить по формулам, представленным в СП16.13330.2017, как для неповрежденных элементов:

$$\frac{N_{ef} + N^{loc}}{AR_y \gamma_c} + \frac{M_{x,ef} + M_x^{loc}}{W_x R_y \gamma_c} + \frac{M_{y,ef} + M_y^{loc}}{W_y R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (10)$$

где $N^{loc} = N_{f,0} + N_{w,0}$, $M_x^{loc} = N_{f,0} \cdot y_{f,0} + N_{w,0} \cdot y_{w,0}$, $M_y^{loc} = N_{f,0} \cdot x_{f,0}$ – дополнительные фиктивные силовые факторы, компенсирующие повреждения.

Проверка прочности при общем нагружении с учетом развития пластических деформаций выполняется по формуле СП16.13330.2017, с догружением фиктивными силовыми факторами, компенсирующими повреждения:

$$\left(\frac{N_{ef} + N^{loc}}{AR_y \gamma_c} \right)^n + \frac{M_{x,ef} + M_x^{loc}}{c_x W_x R_y \gamma_c} + \frac{M_{y,ef} + M_y^{loc}}{c_y W_y R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (11)$$

Или по уточненным формулам, представленным в работе Г.И. Белого и А.И. Гарипова, учитывающим взаимное влияние усилий на развитие пластических деформаций:

$$\left(\frac{M_{x,ef} + M_x^{loc}}{c_{xz} W_x R_y \gamma_c} \right)^p + \left(\frac{M_{y,ef} + M_y^{loc}}{c_{yz} W_y R_y \gamma_c} \right)^q \leq 1, \quad (12)$$

где $n = 1,5$, $c_x = 1,47 + 6\alpha_f / (1 + 6\alpha_f)$ и $c_y = 1,47$ – коэффициент для расчета элементов конструкций с учетом развития пластических деформаций; $c_{xz} = c_x \left(1 - (N_{ef} + N^{loc} / AR_y \gamma_c)^{n_x} \right)$ – коэффициент учета развития пластических деформаций при совместном действии продольной силы и изгибающего момента в плоскости стенки; $c_{yz} = c_y \left(1 - (N_{ef} + N^{loc} / AR_y \gamma_c)^{n_y} \right)$ – то же, в плоскости полок; $n_x = 1 + 1 / (1 + 2,3\alpha_f)$ – коэффициент учета развития пластических деформаций при совместном действии продольной силы и изгибающего момента в плоскости стенки; $n_y = 1,75 + 1 / \alpha_f \leq 10$ – то же, в

плоскости полок; $p = \frac{2,3}{\sqrt[5]{\alpha_f}} - \frac{(N_{ef} + N^{loc})(3 - 0,4\alpha_f)}{AR_y \gamma_c} \geq 1$ и

$q = 1 + \left(\frac{(N_{ef} + N^{loc})(2,45 - 0,6 \ln \alpha_f)}{AR_y \gamma_c} \right)^3 \geq 1$ – коэффициенты учета совместного

действия изгибающих моментов при упругопластической стадии работы.

В третьей главе рассматривается исследование устойчивости выделенных из эксплуатируемых стальных конструкций по расчетной длине элементов, имеющих общее искривление оси и различные типы повреждений. Последние, как показано во второй главе, сводятся к

эквивалентному ослаблению сечения в виде выреза. Выделенный элемент рассматривается шарнирно закрепленным на торцах, концевые сечения которого свободно деформируются при отсутствии угла закручивания опорных узлов. Загружение рассматривается действием продольной силы N^0 с равными концевыми эксцентриситетами в плоскости большей жесткости $e_{y*}^0 = e_y^0$ и из этой плоскости $e_{x*}^0 = e_x^0$.

Деформационная задача решается на упругой модели стержня с постоянной жесткостью (см. рисунок 5а), нагруженной продольной силой N^* с двухосным эксцентриситетом e_y^* и e_x^* .

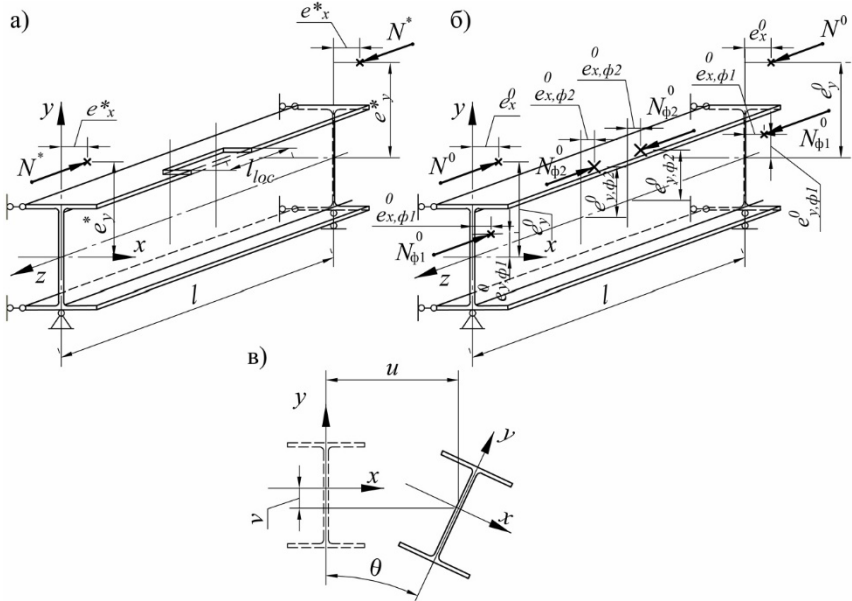


Рисунок 5 – Расчётная схема стержня: а) – упругопластического с локальным повреждением (вырезом); б) – неповреждённого упругого догруженного фиктивными силами; в) – схема деформирования

Физическая нелинейность учитывается введением в расчетную упругую модель (см. рисунок 5а) эквивалентной фиктивной силы $N_{\phi 1}^0$, приложенной на торцах с эксцентриситетом $e_{y,\phi 1}^0$ и $e_{x,\phi 1}^0$ (см. рисунок 5б), которая будет определяться с помощью алгоритма «сечение» в наиболее напряженной средней части неповрежденного элемента.

Влияние локального (обобщенного) повреждения с вырезом длиной l_{loc} и шириной b_{loc} (см. рисунок 5а) компенсируется догрузкой локальной фиктивной силой $N_{\phi 2}^0$ с двухосным эксцентриситетом $e_{y,\phi 2}^0$ и $e_{x,\phi 2}^0$ (см. рисунок 5б).

Таким образом, задачу устойчивости сжато-изогнутого в двух плоскостях упругопластического стержня с локальным повреждением (вырезом) сводим к задаче неповреждённого упругого стержня, с дополнительным догружением фиктивными силами с двухосными эксцентриситетами: $N_{\phi 1}$, компенсирующей развитие пластических деформаций; $N_{\phi 2}$, учитывающей влияние локального повреждения.

Ослабление, вызванное общим коррозионным повреждением, распространённым по всей длине стержня, может быть компенсировано фиктивными силами $N_{\phi 1}$ и $N_{\phi 2}$, действующими по торцам элемента с двухосными эксцентриситетами. При этом последняя учитывает общее ослабление сечения в сочетании с потерей местной устойчивости.

Для исследования деформированных состояний воспользуемся технической теорией и деформационной теорией упругих стержней. Пренебрегая малыми разгружающим влиянием изгибно-крутильных перемещений u и θ на перемещения в плоскости большей жёсткости ($I_x > I_y$) v (см. рисунок 5в) система дифференциальных уравнений равновесия для принятой расчетной схемы стержня принимает вид:

$$E I_x v'' + N^0 v = -N^0 e_{y,v}^0 - N_{\phi 1}^0 e_{y,\phi 1}^0 - N_{\phi 2}^0 e_{y,\phi 2}^0 \Big|_{l_{loc}} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} E I_y u'' + N^0 \left[u + (e_{y,u}^0 - a_y) \theta \right] v &= -N^0 e_{x,v}^0 - N_{\phi 1}^0 e_{x,\phi 1}^0 - N_{\phi 2}^0 e_{x,\phi 2}^0 \Big|_{l_{loc}} \\ E I_w \theta^{IV} + G I_k \theta'' + N^0 (e_{y,u}^0 - a_y) u'' + N^0 (i_A^2 + 2\beta_y \cdot e_{y,u}^0) \theta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

При этом заметим, что фиктивные силы $N_{\phi 1}^0$, $N_{\phi 2}^0$ и моменты от их действия $M_{x(y),\phi 1}^0 = N_{\phi 1}^0 e_{x(y),\phi 1}^0$, $M_{x(y),\phi 2}^0 = N_{\phi 2}^0 e_{x(y),\phi 2}^0$ по терминологии А.А. Ржаницина относятся к активным, при действии которых постановка бифуркационной задачи устойчивости невозможна (см. правую часть уравнений (13) и (14)), что позволяет определять перемещения недеформационным расчетом.

Уравнение (13) соответствует изгибной форме потери устойчивости, а система (14) – изгибно-крутильной. В первом случае $e_{y,v}^0$ определяется по максимальному моменту, а во втором $e_{y,u}^0$ – по наибольшему моменту в средней трети длины стержня.

Общее решение уравнения (13) и системы (14), предложенное Г.И. Белым, представляется в виде соответствующих им линейных комбинаций частных решений задач недеформационного расчёта и бифуркационных задач устойчивости.

$$v = (V_{\text{н}} + V_{\text{ф1}}) \cdot 4 \cdot \left(\bar{z} - \bar{z}^2 \right) + V_{\text{д}} \sin \pi \bar{z} + \\ + V_{\text{ф2}} 4 \left\{ \bar{z} \frac{l_{\text{loc}}}{l} - \left[\bar{z} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{l_{\text{loc}}}{l} \right) \right]^2 \right\} \bigg|_{\substack{\bar{z} = 1/2 \\ \bar{z} = 0,5 - l_{\text{loc}}/2l}} \quad (15)$$

$$u = (U_{\text{н}} + U_{\text{ф1}}) \cdot 4 \cdot \left(\bar{z} - \bar{z}^2 \right) + \\ + U_{\text{д}} \sin \pi \bar{z} + U_{\text{ф2}} 4 \left\{ \bar{z} \frac{l_{\text{loc}}}{l} - \left[\bar{z} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{l_{\text{loc}}}{l} \right) \right]^2 \right\} \bigg|_{\substack{\bar{z} = 1/2 \\ \bar{z} = 0,5 - l_{\text{loc}}/2l}} \quad (16) \\ \theta = \theta_{\text{д}} \sin \pi \bar{z}$$

Для определения $V_{\text{д}}$ и $U_{\text{д}}$, $\theta_{\text{д}}$ используем уравнение (13) и систему (14), в которые подставим общее соответствующие им уравнения (15) и (16). Применяв к полученному уравнению и системе алгоритм метода Бубнова-Галёркина определим неизвестные константы. Выполнив данную процедуру относительно безразмерных деформационных перемещений $m_{\text{х,д}} = V_{\text{д}}/\rho_{\text{х}}$, $m_{\text{у,д}} = U_{\text{д}}/\rho_{\text{у}}$, $\theta_{\text{д}}$ получим напряжённое состояние $(\bar{\sigma} = \sigma/R_{\text{у}})$ в наиболее нагруженном сечении $(\bar{z} = 0,5)$ при деформировании стержня по изгибной, изгибно-крутильной и пространственной формам.

Общее решение деформационной задачи упругого стержня при совместном действии фактической силы N^0 и фиктивных сил $N^0_{\text{ф1}}$ и $N^0_{\text{ф2}}$, компенсирующих развитие пластических деформаций и локального повреждения соответственно, получено в аналитическом виде. В сочетании с алгоритмом «сечение» это решение открывает возможность проведения деформационного расчёта в обратной последовательности.

Обратное решение деформационных задач по изгибной и изгибно-крутильной формам, проводится по заданному i -ому деформированному состоянию в наиболее нагруженном сечении $(\bar{z} = 0,5)$ с максимальной относительной деформацией $\bar{\epsilon}_{\text{max},i}$, находящейся в пределах от решения задач прочности $\bar{\epsilon}_{\text{max},i} = 4$ до потери устойчивости в упругой стадии $0,8 \leq \bar{\epsilon}_{\text{max},i}$, которая принимается в зависимости от гибкости элемента. Малым значениям гибкости задают большие значение $\bar{\epsilon}_{\text{max},i}$, а большим – меньшие.

i -е деформированное состояние задается действием упругой продольной силы N_i^* с двухосным эксцентриситетом $e_{\text{у},i}^*$ и $e_{\text{х},i}^*$ (см. рисунок 5а), что соответствует модели неограниченно упругого материала.

Используя (4) и диаграмму $\bar{\sigma}-\bar{\epsilon}$ с помощью обратного численного метода расчета на прочность, изложенного в 2 главе диссертационной работы, определяем величину:

- фактически действующей силы $\varphi^{dam} = N^0 / A \cdot R_y$ с относительными эксцентриситетами m_x и m_y , учитывающей физическую нелинейность и влияние локального повреждения

- фиктивной силы $\varphi_{\phi 1} = N_{\phi 1}^0 / A \cdot R_y$ с $m_{x,\phi 1}^0$ и $m_{y,\phi 1}^0$, характеризующую влияние только физической нелинейности

- локальной фиктивной силы $\varphi_{\phi 2} = N_{\phi 2}^0 / A \cdot R_y$ с $m_{x,\phi 2}^0$ и $m_{y,\phi 2}^0$, определяющей влияние только краевого выреза при упругой работе материала

Как отмечалось ранее, ослабление, вызванное общим коррозионным повреждением, распространённым по всей длине стержня, может быть компенсировано фиктивными силами $N_{\phi 1}$ и $N_{\phi 2}$, действующими по торцам элемента с двухосными эксцентриситетами.

Таким образом, по заданному деформированному состоянию в наиболее нагруженном неповрежденном сечении ($\bar{z} = 0,5$) посредством действия «упругих» усилий N_i^* , $M_{x,i}^*$, $M_{y,i}^*$, при которых достигается $\bar{\epsilon}_{\max,i}$, можно получить параметры действующей и фиктивных сил с соответствующими эксцентриситетами при деформировании стержня по изгибной и изгибно-крутильной формам.

Единственными неизвестными остаются концевые относительные эксцентриситеты фактически действующей силы N^0 при изгибной $m_{x,v}^0$ и изгибно-крутильной $m_{y,v}^0$ формах деформирования.

Определение концевых эксцентриситетов продольной силы

При рассмотрении изгибной формы деформирования элемента, имеющего обобщенное локальное повреждение, концевой относительный эксцентриситет m_x^0 определяется, когда $\bar{y} = 1; \bar{x} = 0$:

$$m_x^0 = \frac{\bar{\epsilon}_{\max} - \left(\varphi_{ex}^* + m_y^0 \varphi_{ex}^{dam} + m_{y,\phi 1}^0 \varphi_{ex,\phi 1} + m_{y,\phi 2}^0 \varphi_{ex,\phi 2} \right)}{\varphi_{ex}^{dam} K_{d,x1}} -$$

$$- m_{x,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{ex,\phi 1}}{\varphi_{ex}^{dam}} \left(1 + \frac{m_{x,\phi 2}^0 \varphi_{ex,\phi 2} K_{d,x2}}{m_{x,\phi 1}^0 \varphi_{ex,\phi 1} K_{d,x1}} \right) \quad (17)$$

$$\text{где } K_{d,x1} = 1 + \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^{-2}}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^{-2}}{\pi^2} \right)^{-1} \left(1 + 0,032 \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^{-2}}{\pi^2} \right);$$

$$K_{d,x2} = 1 + \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^{-2}}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^{-2}}{\pi^2} \right)^{-1} \left[\left(\frac{l_{loc}}{l} \right)^2 \left(\frac{2l}{l_{loc}} - 1 \right) \left(1 - \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^{-2}}{\pi^2} \right) + \right.$$

$$\left. + 1,032 \frac{\varphi_{ex}^{dam} \bar{\lambda}_x^{-2}}{\pi^2} \sin \frac{\pi l_{loc}}{2l} \right].$$

При рассмотрении изгибно-крутильной формы $-m_y^0$ определяется, когда $\bar{x} = \bar{y} = 1$:

$$m_y^0 = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} - \left(\varphi_{yc}^* + m_{x,u}^0 \varphi_{yc}^{dam} + m_{x,\phi 1}^0 \varphi_{yc,\phi 1} + m_{x,\phi 2}^0 \varphi_{yc,\phi 2} \right)}{\varphi_{yc}^{dam} K_{d,y1}} -$$

$$- m_{y,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{yc,\phi 1}}{\varphi_{yc}^{dam}} \left(1 + \frac{m_{y,\phi 2}^0 \varphi_{yc,\phi 2} K_{d,y2}}{m_{y,\phi 1}^0 \varphi_{yc,\phi 1} K_{d,y1}} \right) \quad (18)$$

$$\text{где } K_{d,y1} = 1 + \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^{-2}}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^{-2}}{\pi^2} \right)^{-1} \left[1 + 0,032 \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^{-2}}{\pi^2} + \right.$$

$$\left. + \theta_d \frac{8}{\pi^2} \frac{\rho_x}{\rho_y} \frac{(m_x^0 - m_{ax})}{m_y^0 + m_{y,\phi 1}^0 \frac{\varphi_{\phi 1}}{\varphi_{yc}^{dam}}} \right];$$

$$K_{d,y2} = 1 + \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^{-2}}{8} \left(1 - \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^{-2}}{\pi^2} \right)^{-1} \left[\left(\frac{l_{loc}}{l} \right)^2 \left(\frac{2l}{l_{loc}} - 1 \right) \left(1 - \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^{-2}}{\pi^2} \right) + \right.$$

$$\left. + 1,032 \frac{\varphi_{yc}^{dam} \bar{\lambda}_y^{-2}}{\pi^2} \sin \frac{\pi l_{loc}}{2l} + \theta_d \frac{8}{\pi^2} \frac{\rho_x}{\rho_y} \frac{(m_x^0 - m_{ax})}{m_{y,\phi 2}^0 \frac{\varphi_{\phi 2}}{\varphi_{yc}^{dam}}} \right].$$

Определение коэффициентов потери устойчивости.

Предельная сила, соответствующая потере устойчивости, находится путём последовательного наращивания i -х деформированных состояний в сечении с наиболее нагруженным волокном $\bar{\varepsilon}_{\max,i} (0,8 + \Delta \bar{\varepsilon} \cdot i; \Delta \bar{\varepsilon} = 3,2/n; i = 1, 2 \dots n)$ при фиксированных относительных

концевых эксцентриситетах ($m_{x,i}^0 = \text{const}$ и $m_{y,i}^0 = \text{const}$) продольной силы N^0 (φ_i). Подобный подход даёт ощутимое сокращение времени расчёта. На рисунке 6 показана зависимость φ_i от $\bar{\varepsilon}_i$. Видно, что коэффициенты устойчивости определяется максимальным значением $\varphi^{\text{уст}} = \max(\varphi_i)$.

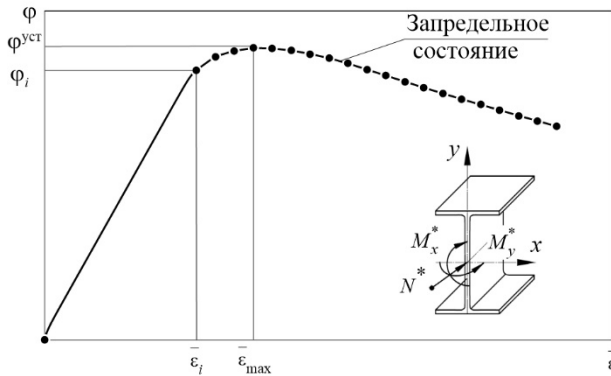


Рисунок 6 – График зависимости коэффициента потери устойчивости от максимальной относительной деформации при $m_{x,i}^0 = \text{const}$ и $m_{y,i}^0 = \text{const}$

В результате проведенного исследования установлены зависимости снижения устойчивости стержней по изгибной и изгибно-крутильной формам от величины наиболее распространённых дефектов и повреждений: начального искривления оси, общего коррозионного износа и локального повреждения в виде выреза.

Общее коррозионное повреждение, уменьшающее толщину элементов сечения прокатного двутавра и провоцирующее тем самым потерю местной устойчивости, при уменьшении площади поперечного сечения на 1–25% снижает устойчивость по изгибной форме в пределах 0,2–27,4% при $m_x=2$ и 0,1–39,5% при $m_x=8$ (см. рисунок 7). Для изгибно-крутильной формы снижение устойчивости составляет 0,3–29,5% при $m_x=2$ и 0,2–31,2% при $m_x=8$. Стоит также отметить, что потеря местной устойчивости происходит преимущественно при больших эксцентриситетах и малых гибкостях. Для оптимально скомпонованного сварного двутавра потеря местной устойчивости элементов сечения происходит при незначительном коррозионном повреждении, что приводит к более резкому снижению устойчивости в пределах 1,5–46,3% по изгибной форме и 3,4–40,1% – по изгибно-крутильной.

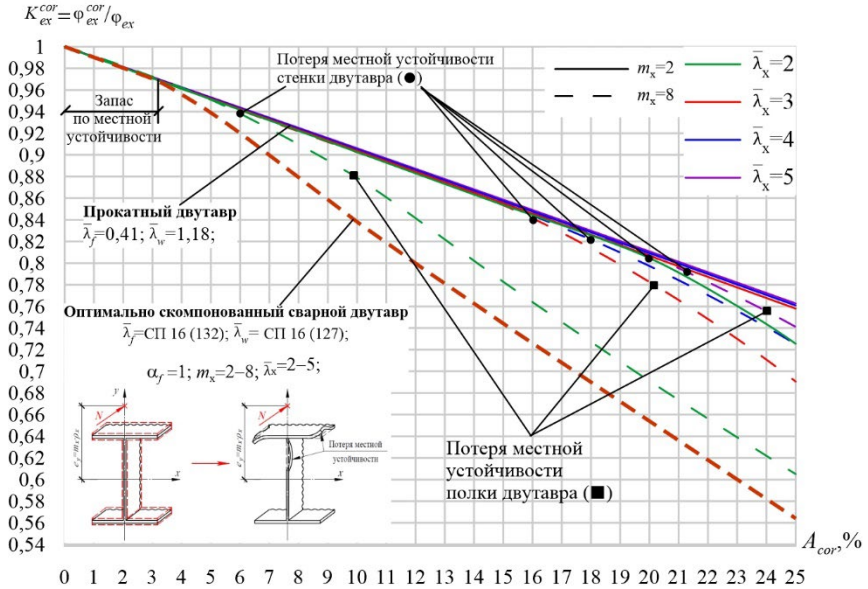


Рисунок 7 – Влияние степени общего коррозионного повреждения $A_{cor}, \%$ на устойчивость стержневого элемента по изгибной форме

Так же было установлено, что симметричное локальное ослабление наиболее напряжённого пояса площадью, составляющей 3% от общей площади, снижает устойчивость по изгибной форме в пределах 1,1–3,3% при $m_x=0,5$ и 2,0–6,3% при $m_x=4$, а при площади ослабления, составляющей 12% устойчивость снижается в пределах 4,9–12,8% при $m_x=0,5$ и 8,4–17,6% при $m_x=4$. Большие значения относятся к меньшим условным гибкостям элемента $\bar{\lambda}_x$, а меньшие – к большим.

На рисунке 9 показано влияние места расположения несимметричного локального повреждения (см. рисунок 8), находящегося в средней трети длины элемента относительно вектора действующих деформационных усилий, на устойчивость по изгибно-крутильной форме. Если ослабление площадью $A_{loc}=1,9-13\%$ от полного сечения располагается в наиболее нагруженных зонах I и III, устойчивость снижается на 5,0–37,0%, превышая относительную площадь повреждения в 2,6–3,1 раза. В менее нагруженных зонах I и IV наблюдается снижение на 0,9–26,1% (в 1,1–2,2 раза больше A_{loc}) и незначительное увеличение до 1,1–1,3% (в 0,2–0,7 раза меньше A_{loc}) устойчивости. Подобное повышение устойчивости связано с тем, что ослабление в зоне II смещает центр тяжести сечения, тем самым уменьшая значение m_y . В зоне IV аналогичный разгружающий эффект создает m_x .

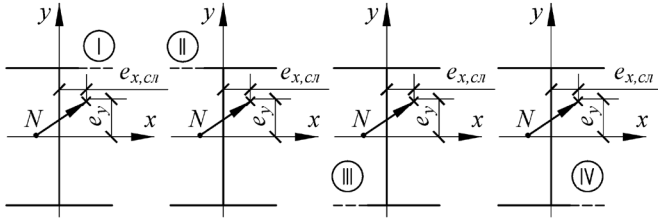
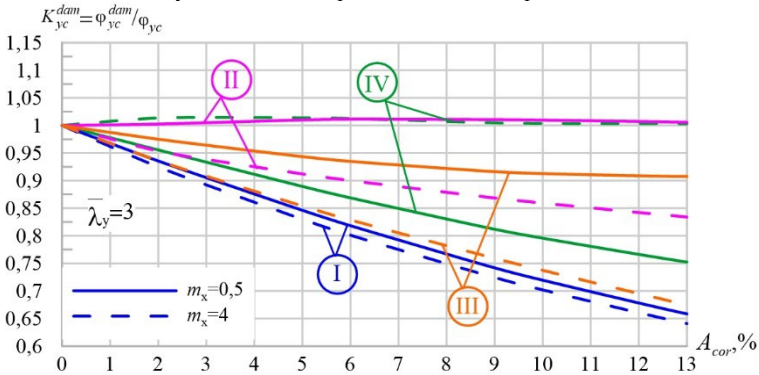


Рисунок 8 – Место расположения повреждения

Рисунок 9 – Влияние площади $A_{loc}, \%$ и места расположения повреждения в сечении на устойчивость по изгибно-крутильной форме при $\bar{\lambda}_y = 3$

Начальные искривления оси элемента в двух главных плоскостях, как известно можно свести к дополнительным эквивалентным эксцентриситетам продольной силы, что в совокупности с эксцентриситетами заданных усилий даёт возможность выполнять расчет как для бездефектного элемента. Анализ влияния начального искривления оси (направление которого не совпадает с направлением эксцентриситетов продольной силы) на устойчивость по изгибно-крутильной форме двутаврового элемента ($\alpha_f = 1,0$) в зависимости от величины дополнительных относительных эксцентриситетов $m_x^{искр}$ и $m_y^{искр}$, показал, что начальное пространственное искривление осей снижает устойчивость по изгибно-крутильной форме в пределах 3,0–38,4% ($m_x^{искр} = 0-1$, $m_y^{искр} = 0,5$) и 5,7–43,9% ($m_x^{искр} = 0-1$, $m_y^{искр} = 1$). Анализ представленных результатов на рисунке 10 свидетельствует о том, что влияние двухосного искривления оси на устойчивость в большей степени зависит от его направления относительно действующих усилий. Отсюда следует, что, как и в задачах прочности, требуется выполнять дополнительную проверку устойчивости по специальной комбинации расчетных усилий,

составленной применительно к месту расположения повреждения или направления искривления оси элемента.

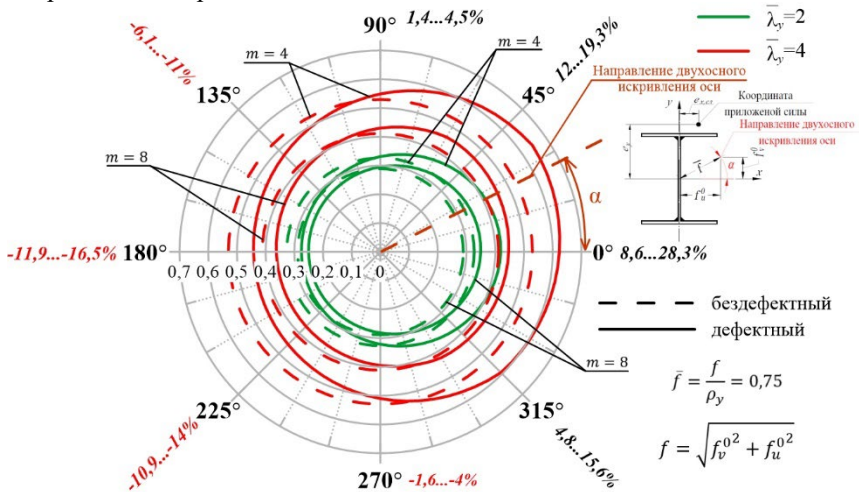


Рисунок 10 – Влияние направления двухосного начального искривления оси $\bar{f} = 0,75$ на коэффициент потери устойчивости

Полученные результаты исследования влияния повреждений и начального искривления оси элемента на устойчивость по изгибной и изгибно-крутильной формам, выраженные коэффициентами снижения устойчивости $K_{ex(ye)}$, могут быть использованы для проверки устойчивости поврежденного элемента по формулам, представленным в действующих нормах проектирования, как для неповрежденного элемента с учетом коэффициентов, учитывающих влияние дефектов и повреждений.

Проверку устойчивости внецентренно-сжатых и сжато-изгибаемых сплошностенчатых элементов с дефектами и повреждениями в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии, предложено выполнять по формуле:

$$\frac{N}{K_{ex}\varphi_{ex}AR_y\gamma_c} \leq 1 \quad (19)$$

Проверку устойчивости внецентренно-сжатых сплошностенчатых элементов с дефектами и повреждениями из плоскости действия момента при изгибе их в плоскости наибольшей жесткости, предложено выполнять по формуле:

$$\frac{N}{K_{ye}c\varphi_yAR_y\gamma_c} \leq 1 \quad (20)$$

где $K_{ex(ye)}^{def}$ – коэффициенты, учитывающие влияние начального искривления оси элемента; $K_{ex(ye)}^{cor}$ – учитывают влияние общего коррозионного повреждения; $K_{ex(ye)}^{dam}$ – учитывают влияние локального повреждения (краевой вырез), величина которого определяется его положением по длине стержня: в случае расположения выреза на концевом участке стержня коэффициент $K_{ex(ye)}^{dam}=1$; если вырез попадает в среднюю треть длины стержня, значение коэффициента принимается в соответствии с данными, полученными в ходе настоящего исследования; в прочих случаях значения принимаются по интерполяции.

В четвертой главе представлены экспериментальные исследования влияния локального повреждения в виде краевого выреза на устойчивость внецентренно сжатого с двухосным эксцентриситетом двутаврового элемента.

В качестве образцов приняты стальные стержни двутаврового сечения профиля 10У по ГОСТ 35087-2024. Материал образцов – сталь СтЗсп по ГОСТ 535-2005. В результате испытаний на растяжение образцов, отобранных из двутавровых стоек, были определены: предел текучести $\sigma_T = 310,2$ МПа и модуль упругости $E = 2,051 \cdot 10^5$ МПа.

Сводные параметры испытательных образцов и конфигурация краевого выреза представлены в таблице 1.

Таблица 1 Параметры испытательных образцов

Серия	Кол-во образцов в серии	Расположение краевого выреза см. рисунок 8	Длина стержня L, мм	Параметры краевого выреза, мм		Площадь краевого выреза, A_{loc} , %
				l_{loc}	b_{loc}	
A1	3	I	1488	150	14	9,3
A2	3	II	1488	150	14	9,3
A3	3	III	1488	150	14	9,3
A4	3	I	1120	110	14	9,3
A5	3	II	1120	110	14	9,3
A6	3	IV	1120	110	14	9,3
B1	3	-	1488	-	-	-
B2	3	-	1120	-	-	-

По результатам обработки полученных экспериментальных данных было установлено, что при расположении повреждения в наиболее нагруженной зоне у образцов A1 и A4 устойчивость снижается в пределах от 20,9% до 23,8%. В случае расположения в менее нагруженной зоне у образцов A2 и A5 снижение устойчивости составляет от 1,3% до 2,4%. При расположении выреза на противоположном поясе относительно

действующей продольной силы устойчивость образцов А3 и А6 снижается на 10,3% и 19,0% соответственно.

Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений предельных сил, определяющих потерю устойчивости, показал их хорошую сходимость. Максимальное отличие экспериментальных данных от теоретических не превысило 4,92%, что свидетельствует о достоверности разработанного метода расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. «Обратные» численный и численно-аналитический методы адаптированы на расчет прочности и общей устойчивости сплошностенчатых элементов стальных конструкций с наиболее распространёнными дефектами и повреждениями, что позволило получить новые данные о особенностях напряженно-деформированных и предельных состояний при общем нагружении.

2. Для унификации решения параметры механических (погнутости, вырывы, истирания) и коррозионных повреждений, вызывающих потерю местной устойчивости, приведены к эквивалентному ослаблению сечения в виде вырезов.

3. Выявлено весьма существенное влияние места расположения повреждения в сечении и направления начального искривления оси на несущую способность эксплуатируемых стальных элементов. При использовании расчетных комбинаций усилий, определяемых как для неповрежденных элементов одна и та же величина дефекта или повреждения может приводить элемент конструкции к работоспособному, ограничено- или неработоспособному состояниям. Все зависит от места его расположения относительно вектора действующих расчетных усилий. Отсюда следует, что проверку прочности и общей устойчивости следует проводить по специальной комбинации расчетных усилий, составленной применительно к месту расположения повреждения или направления искривления оси элемента.

4. Результаты расчетов прочности и устойчивости, выполненные с использованием предложенного метода и метода конечных элементов, продемонстрировали хорошую степень согласованности результатов, что свидетельствует о достоверности разработанного расчётного метода.

5. Экспериментально изучено влияние локального повреждения в виде краевого выреза на устойчивость внецентренно сжатого с двухосным эксцентриситетом двутаврового элемента. Сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений предельных сил, определяющих потерю устойчивости, показал их хорошую сходимость, что свидетельствует о достоверности разработанного метода расчета.

6. На основании проведенных исследований, предложен гармонизированный с СП 16.13330.2017 практический метод расчета

несущей способности элементов стальных конструкций с наиболее распространёнными дефектами и повреждениями.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в периодических научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Белый, Г. И. Совершенствование метода расчета поврежденных элементов стальных конструкций / Г. И. Белый, Е. А. Матвеев // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 4. – С. 544-556. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.4.544-556. – EDN ETLKII.

2. Матвеев, Е. А. Влияние дефектов и повреждений на устойчивость элементов стальных конструкций по изгибной форме / Е. А. Матвеев // Вестник гражданских инженеров. – 2024. – № 6(107). – С. 52-60. – DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-6-52-60. – EDN YZRLMO.

3. Белый, Г. И. Влияние повреждений на устойчивость элементов стальных конструкций по изгибно-крутильной форме / Г. И. Белый, Е. А. Матвеев // Вестник гражданских инженеров. – 2026. – № 2(115). – С. 27-36. – DOI 10.23968/1999-5571-2026-23-2-27-36. – EDN LNAXKU.

4. Матвеев, Е. А. Экспериментальные исследования влияния локального повреждения на устойчивость двутавровых элементов / Е. А. Матвеев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2026. – № 5(809). – С. 137-145. – DOI 10.32683/0536-1052-2026-809-5-137-145. – EDN GYIGZT.

Публикации в других изданиях:

5. Матвеев, Е. А. Сравнительный анализ алгоритма "Сечение" и численного решения задачи прочности элементов стальных конструкций, имеющих дефекты и повреждения / Е. А. Матвеев // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сборник статей 81-ой Всероссийской научно-технической конференции, Самара, 15–19 апреля 2024 года. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2024. – С. 145-151. – EDN SMYWOD.

Компьютерная верстка *О. Н. Комиссаровой*

Подписано к печати 28.09.2026. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 102.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А