



(21)-0421-1

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ НЕСОВЕРШЕНСТВ УГОЛКОВ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СТОЙКИ ПОЯСА ОПОРЫ ЛЭП

Е. В. Горохов^{а,1}, В. Н. Васылев^{а,2}, В. Г. Гаврилов^{б,3}, А. В. Танасогло^{а,4}, Р. И. Игнатенко^{а,5}

^а ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.

^б ООО «ГПК ИНЖИНИРИНГ»,
24 а, ул. Стадионная, г. Донецк, ДНР, 83102.

E-mail: ¹ mk@donnasa.ru, ² wn1951@mail.ru, ³ gavrilov@gmail.com, ⁴ a.v.tan@mail.ru,
⁵ ignatenkori777@mail.ru

Получена 01 марта 2021; принята 26 марта 2021.

Аннотация. В данной статье систематизированы и исследованы возможные геометрические несовершенства равнополочных уголков, влияющие на прочность и несущую способность пояса металлических решетчатых башенных опор ЛЭП в месте стыка. Произведен анализ степени влияния факторов геометрических несовершенств для различных типов болтового соединения уголков пояса опоры. Выполнен численный эксперимент для расчета зависимости несущей способности уголка пояса опоры в стыковом узле от различных факторов. Была использована программа перерасчета усилий с учетом возможных отклонений: допусков по ширине и длине полки уголка; допусков по толщине стенки уголка; смалковки граней уголка; размалковки граней уголка. С помощью уравнения регрессии с рассчитанными коэффициентами получено множество значений продольного усилия N , возникающего в поясе при любых сочетаниях данных факторов. Численный эксперимент проводился для реальных конструкций на основании фактических данных. Предложены рекомендации для заводов-изготовителей, которые заключаются в обязательном выполнении входного контроля минусового допуска толщины уголка ($-dt = 1,2$ мм максимальное значение) на этапе изготовления.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи (ВЛ), металлическая опора, болтовое соединение, регрессионный анализ, факторы влияния, коэффициенты значимости факторов.

ВПЛИВ ГЕОМЕТРИЧНИХ НЕДОСКОНАЛОСТЕЙ КУТНИКІВ НА НЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ СТІЙКИ ПОЯСА ОПОРИ ЛЕП

Є. В. Горохов^{а,1}, В. М. Василев^{а,2}, В. Г. Гаврилов^{б,3}, А. В. Танасогло^{а,4}, Р. І. Ігнатенко^{а,5}

^а ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.

^б ТОВ «ГПК ІНЖИНІРИНГ»,
24 а, вул. Стадіонна, м. Донецьк, ДНР, 83102.

E-mail: ¹ mk@donnasa.ru, ² wn1951@mail.ru, ³ gavrilov@gmail.com, ⁴ a.v.tan@mail.ru,
⁵ ignatenkori777@mail.ru

Отримана 01 березня 2021; прийнята 26 березня 2021.

Анотація. У даній статті систематизовані і досліджені можливі геометричні недосконалості рівнополочних кутчиків, що впливають на міцність і несучу здатність пояса металевих ґратчастих баштових опор ЛЕП в місці стику. Зроблено аналіз ступеня впливу факторів геометричних недосконалостей для

різних типів болтового з'єднання куточків пояса опори. Виконано чисельний експеримент для розрахунку залежності несучої здатності куточка пояса опори в стиковому вузлі від різних факторів. Була використана програма перерахунку зусиль з урахуванням можливих відхилень: допусків по ширині і довжині полки куточка; допусків по товщині стінки куточка; смалковки граней куточка; розмалковки граней куточка. За допомогою рівняння регресії з розрахованими коефіцієнтами отримана множина значень поздовжнього зусилля N , що виникає в поясі при будь-якому поєднанні цих факторів. Чисельний експеримент проводився для реальних конструкцій на підставі фактичних даних. Запропоновано рекомендації для заводів-виготовлювачів, які полягають в обов'язковому виконанні вхідного контролю мінусового допуску товщини куточка ($-dt = 1,2$ мм максимальне значення) на етапі виготовлення.

Ключові слова: повітряна лінія електропередавання (ВЛ), металева опора, болтове з'єднання, регресійний аналіз, чинники впливу, коефіцієнти значущості чинників.

INFLUENCE OF GEOMETRIC IMPERFECTIONS OF THE CORNERS ON THE LOAD-BEARING CAPACITY OF THE RACK BELT OF THE POWER LINE SUPPORT

Yevgen Gorokhov ^{a,1}, Volodymyr Vasylev ^{a,2}, Valery Gavrilov ^{b,3}, Anton Tanasoglo ^{a,3}, Roman Ignatenko ^{a,4}

^a Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.

^b LLC «GPK ENGINEERING»,
24 a, Stadionnaya Str., Donetsk, DPR, 83102.

E-mail: ¹ mk@donnasa.ru, ² wn1951@mail.ru, ³ gavrilov@gmail.com, ⁴ a.v.tan@mail.ru,

⁵ ignatenkori777@mail.ru

Received 01 March 2021; accepted 26 March 2021.

Abstract. In this article, we systematize and investigate possible geometric imperfections of equal-field corners that affect the strength and load-bearing capacity of the belt of metal lattice tower supports of power lines at the junction. The analysis of the degree of influence of factors of geometric imperfections for various types of bolted connection of the corners of the support chord is carried out. A numerical experiment was performed to calculate the dependence of the bearing capacity of the support chord corner in the butt joint on various factors. A program was used to recalculate efforts taking into account possible deviations: tolerances in the width and length of the angle flange; wall thickness tolerances of the corner; smoothing the edges of the corner; grind the edges of the corner. Using the regression equation with the calculated coefficients, a set of values of the longitudinal force N arising in the belt for any combination of these factors was obtained. A numerical experiment was carried out for real structures based on actual data. Recommendations are proposed for manufacturers, which consist in the mandatory implementation of the input control of the minus tolerance of the corner thickness ($-dt = 1,2$ mm maximum value) at the manufacturing stage.

Keywords: overhead power line (OHL), metal support, bolted connection, regression analysis; factors of influence, coefficients of significance of factors.

Формулировка проблемы

Одна из серьезнейших проблем в энергетике – старение и нехватка основных фондов. Многие существующие линии ЛЭП на территории ДНР

нуждаются в капитальном ремонте, планируется прокладка новых линий. Требуется значительный объем возведения линий электропередач,

обусловленный постоянно возрастающими потребностями промышленности и населения в электроэнергии.

Опоры ЛЭП относятся к одним из самых сложных проектируемых объектов. В процессе эксплуатации конструкция опоры должна обеспечить устойчивость геометрической формы и неизменяемость конструктивных элементов в этой форме, устойчивость и прочность каждого элемента и их соединений между собой. В конструкции таких сооружений нет ничего лишнего. Такая рациональность приводит к экстремальным условиям возведения и эксплуатации этих объектов.

Анализ последних исследований и публикаций

Статистические данные причин выхода из строя металлических решетчатых башенных опор ЛЭП (рис. 1) показывают, что аварии металлоконструкций опор на различных этапах жизненного цикла происходят по следующим причинам: дефекты материалов и конструкций на стадии изготовления (22,48 %), нарушения и ошибки на стадии строительно-монтажных работ (47,69 %) [1, 2]. Следует учитывать, что дефекты и повреждения образуются как на стадии изготовления элементов конструкций и монтажных работ, так и на стадии эксплуатации. Имеющиеся дефекты при эксплуатации опоры получают дальнейшее развитие, что приводит к выходу опоры из строя.

Общее состояние объекта, обеспечивающее соблюдение конструктивной безотказности напрямую зависит от состояния его элементов.

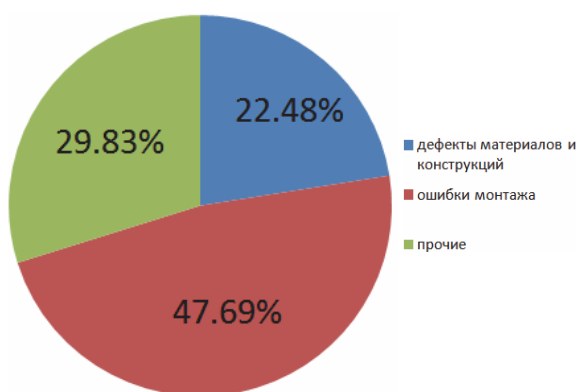


Рисунок 1. Причины аварий опор.

Основные факторы, которые влияют на уровень надежности металлоконструкций опор, могут быть отнесены к пяти видам:

- 1) общие нагрузки и прочие воздействия;
- 2) механические свойства металла уголков и метизов;
- 3) геометрические размеры элементов опоры;
- 4) несовершенства и отклонения на стадии изготовления элементов конструкции, транспортировки и монтажа;
- 5) условия работы конструкции в период эксплуатации.

Выход из строя одного элемента, например болтового соединения уголков пояса опоры, приводит к аварийному состоянию всей опоры. Следовательно надежность работы опоры на всех этапах жизненного цикла можно определить как совокупную надежность всех элементов и их соединений с учетом несовершенств элементов опоры на стадии изготовления и последующей сборки и монтажа.

При проведении испытаний металлических башенных решетчатых опор ЛЭП на испытательном полигоне ДонНАСА [3] было определено, что в 90 % случаев разрушение опоры происходило по причине потери устойчивости пояса в панелях выше стыкового узла, причем эти панели не являлись расчетными при подборе сечения пояса. Исходя из этих данных можно сделать обоснованный вывод, что стыковой узел пояса опоры оказывает влияние на несущую способность пояса. Действующие нормы расчета опор ЛЭП учитывают только условия работы двух нижних панелей [4]. Поэтому возникает необходимость в исследовании факторов, влияющих на несущую способность пояса металлических башенных решетчатых опор ЛЭП со стыковым узлом (рис. 2).

При многих способах монтажа металлических башенных решетчатых опор ЛЭП они собираются из отдельных плоских стержневых конструкций (панелей). Действительные или фактические размеры отдельных сборочных элементов часто отличаются от нормируемых значений на величины погрешностей, ограниченные соответствующими нормативными допусками [9]. Из-за случайного характера действительного размера каждого элемента конструкции вследствие накопления погрешностей всех составляющих элементов блоков фактические

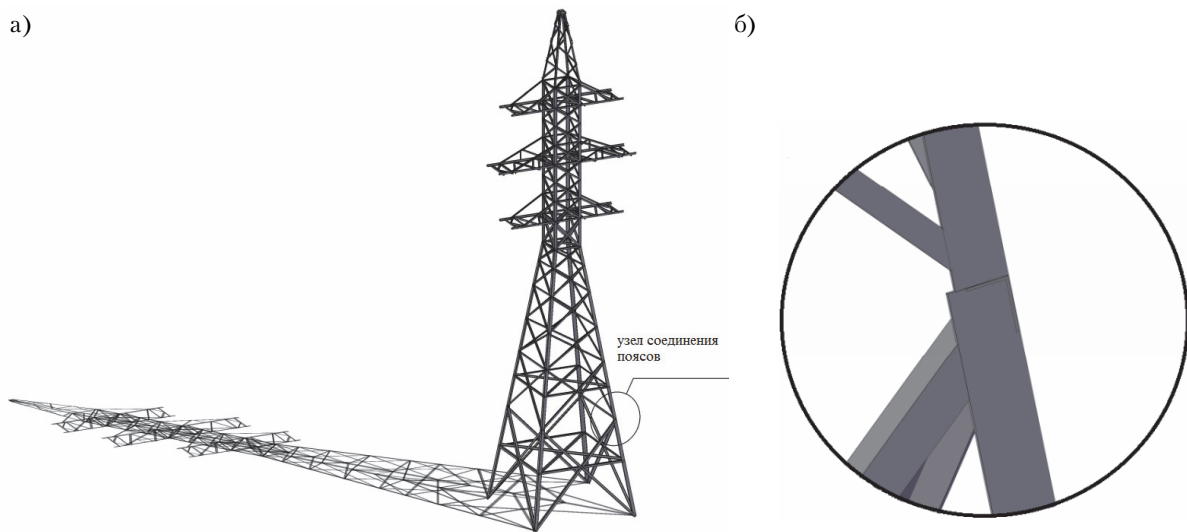


Рисунок 2. Металлическая башенная решетчатая опора ЛЭП: а) общий вид опоры; б) узел соединения поясов опоры.

размеры и геометрическая форма элементов и панелей будут разными. Это отражается на их собираемости в единый блок ствола опоры.

Погрешности в размерах и геометрической форме панелей ствола опоры накладывают на их сопряжения особенности, связанные с конструктивными трудностями выполнения болтовых соединений. Это объясняется тем, что группы отверстий в соединяемых элементах смещаются относительно друг друга и установка болтов в отверстия между соединяемыми элементами становится проблематичной.

Также существенное влияние на несущую способность болтовых соединений оказывает изменение углов прилегания уголков в месте стыка, обусловленное «смазкой» и «размазкой» элементов.

«Размазка» – трансформация поперечного сечения уголкового профиля путем разгибания полок наружу (угол $> 90^\circ$), обратный процесс с загибом полок внутрь (угол $< 90^\circ$) – «смазка» (рис. 3, 4).

Статистические данные о количестве и величине отклонений типоразмеров уголков пояса опор ЛЭП, собранные на Донецком заводе высоковольтных опор [10], позволяют утверждать, что большая часть стержневых элементов изготовлена с теми или иными отклонениями от нормали. Произведено более 2 000 замеров. Замерялись следующие параметры: ширина полки уголка, длина полки уголка, угол сопряжения граней уголка. На основании полученных

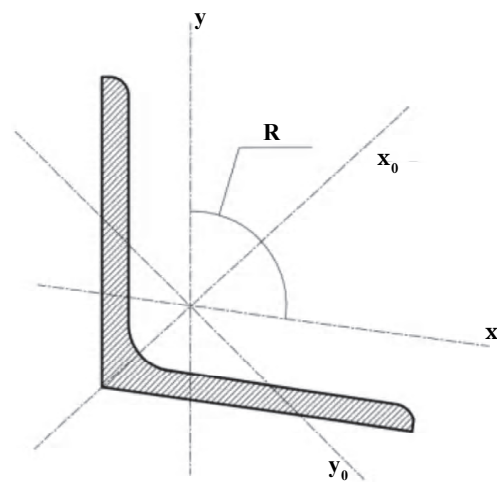


Рисунок 3. «Размазка» $R > 90^\circ$

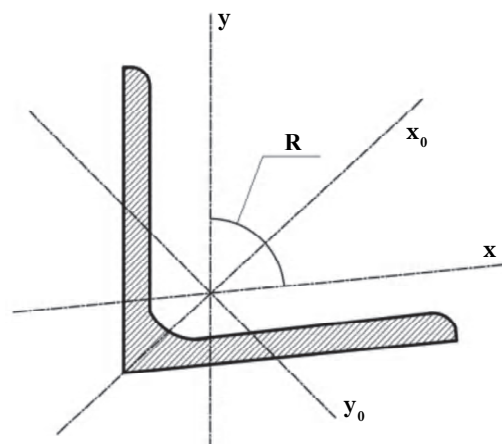


Рисунок 4. «Смазка» $R < 90^\circ$

данных можно говорить о том, что наибольшее влияние несовершенства и неточности элементов при изготовлении будут оказывать на прочность и устойчивость стыков элементов с болтовым соединением.

Стыковые узлы соединений поясов опор применяются в нескольких вариантах.

«Телескоп» – узел соединения элементов пояса внахлест (рис. 5). Этот тип соединения позволяет стыковать элементы пояса без дополнительных деталей и является наиболее экономичным стыковым узлом. На верхний элемент пояса опоры накладывается нижний и крепятся между собой болтами. И если с учетом экономичности и технологичности этот тип узла наилучший, то с учетом работы в составе конструкции он хуже из-за того, что рассматриваемый тип стыка дает эксцентричное соединение, в котором силовой поток отклоняется от своего первоначального направления по оси болта, и возникают дополнительные изгибающие моменты, не учитываемые расчетом.

«На накладках» – тип узла, который представляет собой соединение элементов встык с использованием двухсторонних накладок с болтовым соединением (рис. 6), обеспечивающих симметричную передачу усилий, но приводящий к общему удорожанию за счет увеличения количества деталей и метизов в узле, а также стоимости сборки. Этот тип узла позволяет уменьшить эксцентриситет соединения, а также благодаря значительной жесткости самого соединяемого профиля эксцентриситет фиксации накладок слабо влияет на общую работу соединения. В этом типе стыка эксцентриситет возникает только при состыковке уголков с различными типоразмерами.

В панелях со стыками необходимо проверить устойчивость пояса при сжатии, прочность пояса при сжатии, прочность стыковых накладок (если стык «На накладках») [5].

Для определения зависимости несущей способности уголка пояса опоры в стыковом узле от различных факторов была использована программа перерасчета усилий с учетом возможных отклонений [6]:

- допусков по ширине полки уголка;
- допусков по толщине стенки уголка;
- смалковки граней уголка;
- размалковки граней уголка.

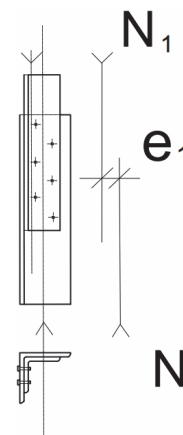


Рисунок 5. Схема узла «телескоп».

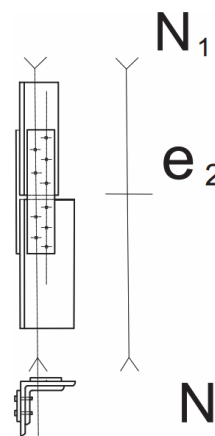


Рисунок 6. Схема узла «на накладках».

Полученные результаты расчета представлены на диаграммах (рис. 7, 8). На диаграммах (рис. 7, 8) по оси ординат отмечено (в соответствии с данными нормативов) максимально допустимое усилие при различных сочетаниях нормативных допусков. Расчетные панели конструкций опор взяты из реальных проектов с учетом соединения уголков двумя способами – «телескоп», «на накладках». На диаграммах (рис. 7, 8, 9) выявлен разброс несущей способности пояса опоры N , составляющий для типа узла «телескоп» – 14 %, для узла «на накладках» – 13 %.

Так как разрушение конструкции происходит по причине потери устойчивости, необходимо проверить устойчивость пояса опоры при сжатии. Для этого необходимо проанализировать формулу:

$$N \leq R_y A \varphi_c \gamma_c \quad (1)$$

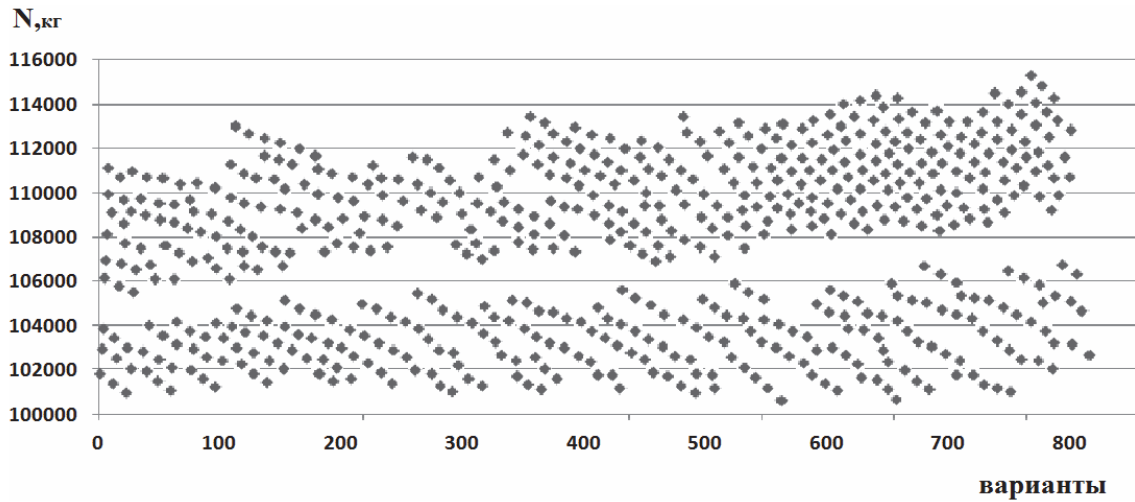


Рисунок 7. Результаты перерасчета (тип узла «на накладках»).

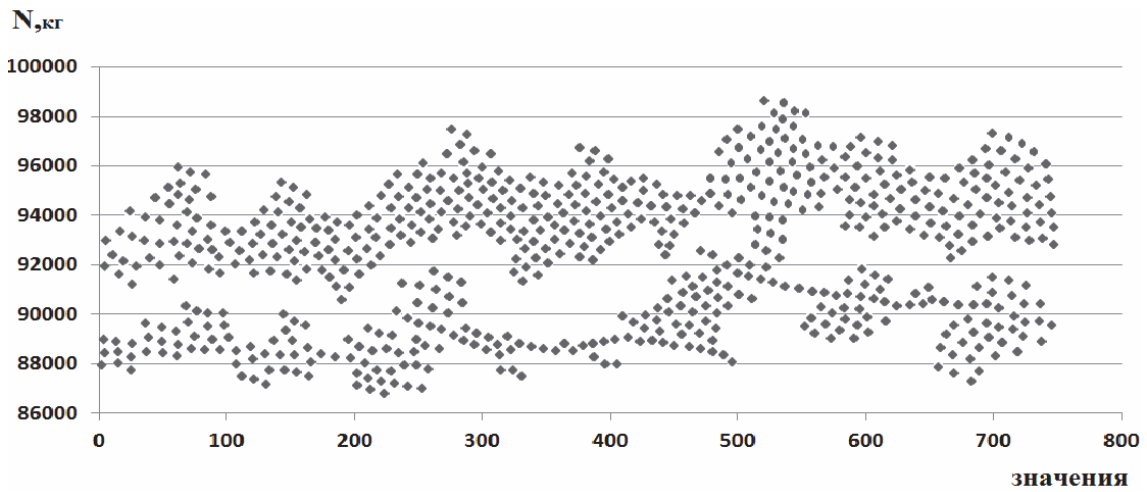


Рисунок 8. Результаты перерасчета (тип узла «телескоп»).

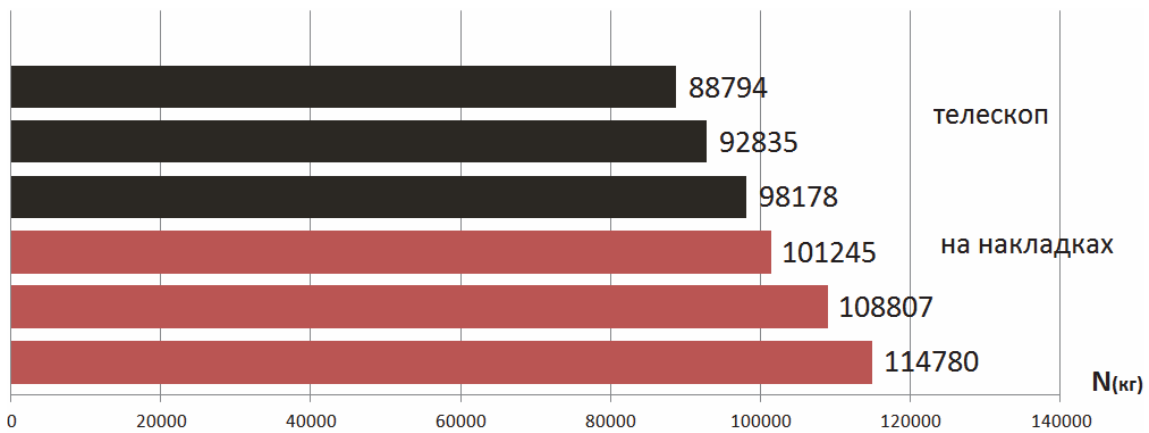


Рисунок 9. Разброс усилий.

Расчетное сопротивление стали R_y и коэффициент условий работы γ_c принимаем полностью детерминированными. Следует определить, какие факторы влияют на величину площади поперечного сечения верхнего уголка A и коэффициент продольного изгиба φ_c . Из формулы (1) видно, что изменение площади поперечного сечения A прямо пропорционально влияет на изменение величины продольного усилия в поясе N . На рис. 11 показана зависимость несущей способности верхнего уголка соединения от его площади поперечного сечения. Следовательно возникает 9 вариантов величин площади поперечного сечения, так как при расчете несущей способности узла исходными данными являлись следующие величины геометрических допусков размеров уголков:

- по толщине ($-dt$; 0 ; $+dt$);
- по ширине ($-db$; 0 ; $+db$).

Получается 9 возможных сочетаний отклонений типоразмеров, в которых при сочетаниях ($-dt$; db), ($-dt$; $-db$), ($-dt$; 0), ($-dt$; $+db$) несущая способность уголка N всегда меньше расчетной, при сочетаниях (0 ; $-db$), (0 ; 0), (0 ; $+db$) незначительная часть усилий меньше расчетной. На несущую способность уголка наибольшее влияние оказывает коэффициент продольного изгиба φ_c , поскольку приращение площади поперечного сечения только из-за допуска по ширине полки невелико. Усилия для трех площадей фактически равны, даже при сочетании отклонений (0 ; $+db$) получается наименьшая величина несущей способности из трех возможных сочетаний.

Из приведенного анализа следует вывод, что на снижение несущей способности при возможных сочетаниях допусков наибольшее влияние оказывает смалковка (размалковка) граней уголков.

Диаграмма (рис. 10) показывает зависимость изменения несущей способности уголка пояса от величины допусков по толщине полки. Можно видеть, что при «отрицательных» величинах толщин ($t-dt$) практически при любых сочетаниях отклонений несущая способность меньше расчетной, следовательно «отрицательный» допуск по толщине оказывает значительное влияние на несущую способность уголка. Фактор изменения толщины стенки принимается как значимый при расчете несущей способности пояса опоры со стыковым узлом любого типа.

Диаграмма (рис. 12) показывает зависимость изменения несущей способности уголка пояса от величины допусков по ширине полки уголка. При любых значениях b ($b-db$; b ; $b+db$) несущая способность уголка пояса может принимать значение как больше, так и меньше расчетного. Минимальное значение величина несущей способности принимает при ширине полки уголка $b+db$, из чего следует, что положительное значение допуска по ширине полки влияет на величину эксцентриситета, а сам фактор изменения ширины не является значимым при расчете несущей способности пояса опоры со стыковым узлом.

Величина площади поперечного сечения уголка A зависит от величин геометрических размеров: b – ширины полки уголка; t – толщины полки уголка. Так как в нормативной литературе указаны величины допусков, как в большую, так и в

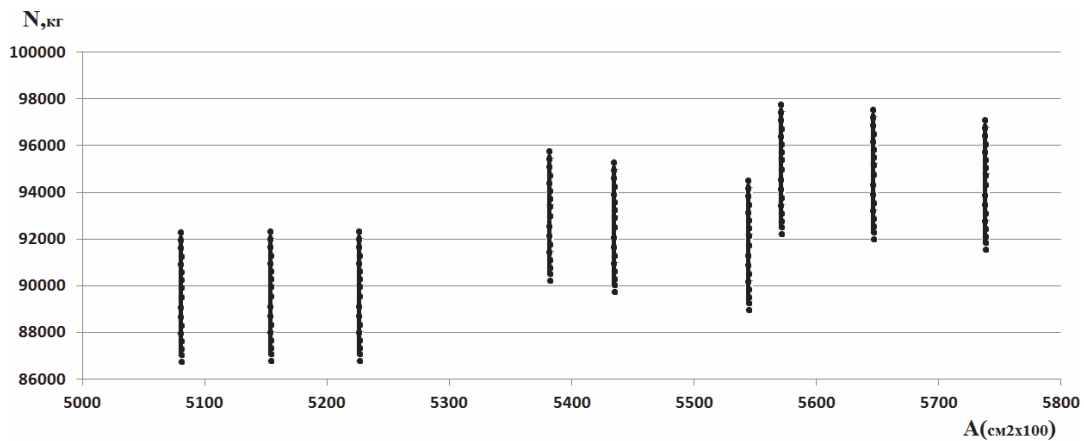


Рисунок 10. Зависимость несущей способности уголка от площади поперечного сечения.

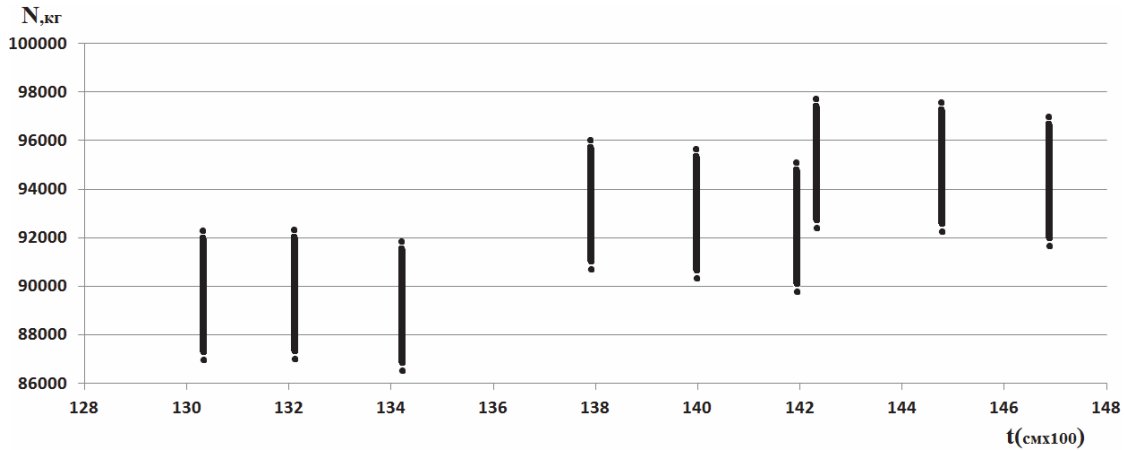


Рисунок 11. Зависимость несущей способности уголка от толщины полки.

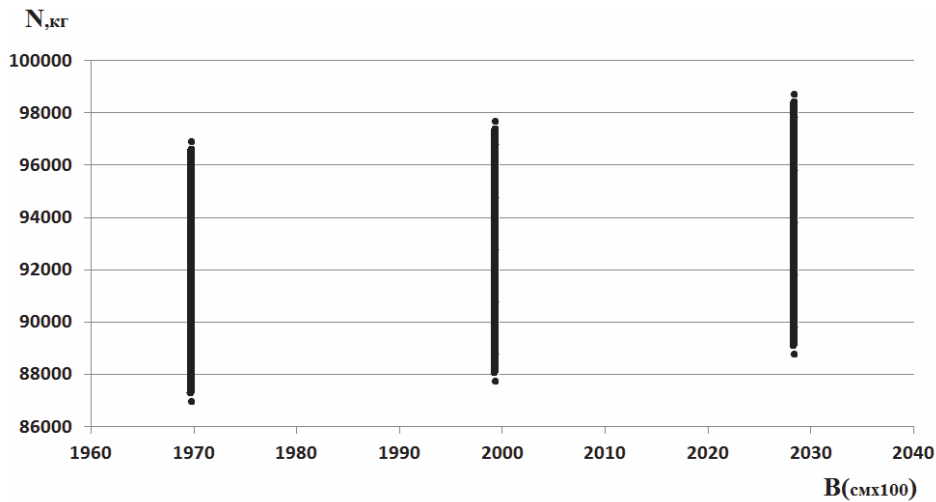


Рисунок 12. Зависимость несущей способности уголка от ширины полки.

меньшую сторону, величины геометрических размеров находятся в интервалах $[b-db; b+db]$, $[t-dt; t+dt]$. Следовательно, величина площади поперечного сечения уголка A находится в интервале $[A-dA < A < A+dA]$. Величина значения коэффициента продольного изгиба существенно зависит от многих факторов. Коэффициент продольного изгиба φ_c можно представить как функцию $\varphi_c = f[\lambda; m_{cf}]$. Если принять значение $\lambda = 100$, то значение коэффициента φ_c зависит от приведенного эксцентриситета m_{cf} . В свою очередь величина m_{cf} зависит от следующих факторов:

- e_0 – эксцентриситет;
- k – доля момента от эксцентриситета нормальной силы в стыке, воспринимаемая уголком;

- A – площадь сечения брутто уголка;
- x – расстояние от осей $y_0 - y_0$ до наиболее сжатого волокна уголка;
- I_{\min} – соответствующий минимальный момент инерции.

Принимаем, что величины значений моментов инерции, радиусов инерции, расстояния от осей до наиболее сжатых волокон уголка практически не зависят от геометрических допусков $[db; dt]$. Доля момента, воспринимаемая уголком, зависит только от длин данной и смежной панелей. Так как длина панели является исходным фактором, то коэффициент k не является влияющим фактором на величину усилия в верхнем уголке пояса N . Площадь поперечного сечения A

зависит от размерных геометрических допусков $[db; dt]$, то есть величина приведенного эксцентриситета m_{cf} прямо пропорционально зависит от величины площади поперечного сечения. Величина приведенного эксцентриситета m_{cf} также прямо пропорционально зависит от расстояния между центрами тяжести стыкуемых уголков.

В стыке типа «телескоп» на расстояние между центрами тяжести стыкуемых уголков оказывает влияние, кроме собственных геометрических размеров, изменение толщины полки нижнего уголка пояса $[-dt; +dt]$. Помимо этого, на величину эксцентриситета m_{cf} влияет сочетание смалковки или размалковки верхнего и нижнего уголка $[-dc, +dc]$ (рис. 3, 4). Случай сочетания с максимальным эксцентриситетом: верхний уголок размалкован, нижний – смалкован $[-d_1c_1, +d_2c_2]$ (рис.13).

В стыке типа «на накладках» на расстояние между центрами тяжести стыкуемых уголков оказывают влияние только собственные геометрические размеры уголков, то есть размерные допуски по толщине $[-dt; +dt]$ и по ширине $[db; +db]$.

Смалковкой и размалковкой в любых сочетаниях можно пренебречь, так как на положение собственного центра тяжести влияние это не оказывает (для равнополочного уголка $\perp 200 \times 16$ мм.) Центр тяжести накладок соединения практически совпадает с осью приложения усилия к верхнему уголку и расстояние между центром тяжести верхнего уголка и центром тяжести стыковых накладок заведомо меньше, чем эксцентриситет между верхним и нижним уголком.

Можно сделать вывод, что для двух рассматриваемых типов стыков «телескоп» и «на накладках» значимыми факторами при расчете прочности и устойчивости пояса опоры являются размерные допуски при изготовлении уголков, а для типа стыка «телескоп» еще и величина смалковки и размалковки каждого из уголков.

Зависимости можно представить в виде:

$$N_{\text{телескоп}} = f(dt_1, db_1, c_1, dt_2, db_2, c_2), \quad (2)$$

$$N_{\text{на накладках}} = f(dt_1, db_1, dt_2, db_2). \quad (3)$$

На рассматриваемую систему (стыковое соединение уголков пояса опоры) влияет большое количество факторов, определяющих прочность и устойчивость системы. Определить значимость каждого из факторов и эффект их взаимодей-

ствия можно с помощью математической модели, построенной на основании принципов решения многокритериальных задач. Для представления системы в виде математической модели следует выполнить следующие операции:

- аппроксимировать множество данных моделью,
- найти оптимальные условия,
- определить структуры связей между зависимыми и независимыми переменными для получения модели, отражающей эту структуру.

В качестве отклика функции принимаем усилие, возникающее в уголке стыка пояса с учетом значимых факторов влияния: размерных допусков $(-dt, +dt)$, смалковки и размалковки уголка $(-dc, +dc)$.

Анализ схемы и методики расчета усилий в панели стойки опоры показывает, что на значение усилий можно влиять за счет изменения фактора площади поперечного сечения уголка. Величины эксцентриситетов могут быть как исходными данными для анализа, так и для конкретного стыкового узла могут находиться в пределах определенного интервала. Следовательно, принимаем величины эксцентриситетов m_{cf} как фактор. Для нахождения коэффициентов уравнения регрессии и выбора значимых факторов проведен численный эксперимент [5] (рис.14):

- x_1 – допуск по толщине полки верхнего уголка стыка $(-d_1t; +d_1t)$;
- x_2 – допуск по ширине полки верхнего уголка стыка $(d_1b; +d_1b)$;
- x_3 – смалковка (размалковка) верхнего уголка $(-d_1c; +d_1c)$;
- x_4 – допуск по толщине полки нижнего уголка стыка $(-d_2t; +d_2t)$;
- x_5 – допуск по ширине полки нижнего уголка стыка $(d_2b; +d_2b)$;
- x_6 – смалковка (размалковка) нижнего уголка $(-d_2c; +d_2c)$.

Вариативными являются все шесть факторов. Интервалом вариативности являются минимальный и максимальный допустимые допуски от нормали. Для проведения численного эксперимента разработана программа расчета на основе существующей методики [7].

Расчеты показывают, что допуски по толщине $(-d_1t; +d_1t)$ и ширине полки $(d_1b; +d_1b)$ верхнего уголка узла (x_1, x_2) меняют величину площади

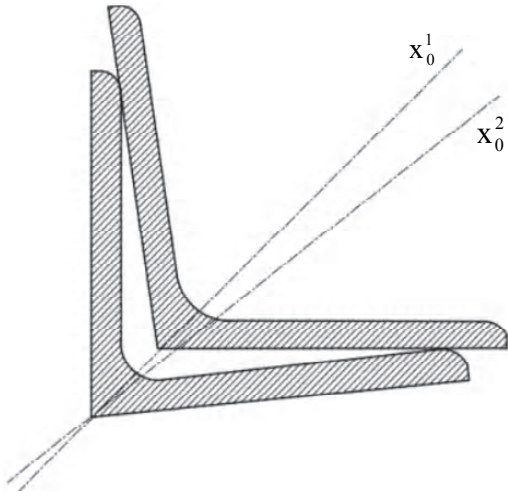


Рисунок 13. Случай сочетания: верхний уголок размалкован, нижний – смалкован.

поперечного сечения до 10% от общего значения. Влияние эксцентриситета m_{cf} на результаты расчета – незначительное. Изменение допусков по толщине ($d2t; +d2t$) и ширине полки ($d2b; +d2b$) нижнего уголка стыка, смалковка (размалковка) верхнего ($-d1c; +d1c$) и нижнего ($-d2c; +d2c$) уголка узла (x_3, x_4, x_5, x_6) оказывают значительное влияние на изменение величины эксцентриситета m_{cf} .

Усилие N в стержне представим математической моделью в виде полного уравнения линейной регрессии.

Следовательно, имеем:

$$c_0 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{15}x_1x_5 + b_{123456}x_1x_2x_3x_4x_5x_6. \quad (4)$$

Общее количество всех возможных эффектов, включая линейные эффекты и взаимодействия всех порядков находится по формуле:

$$C_m^k = \frac{k'}{m'(k-m)}, \quad (5)$$

где k – число факторов,

m – число элементов во взаимодействии.

С учетом количества факторов, которое равно шести, полнофакторный эксперимент будет состоять из 64 опытов. При реализации полнофакторного эксперимента можно определить взаимодействия всех порядков, но в этом нет необходимости. Количество опытов значительно превосходит число определяемых коэффициентов

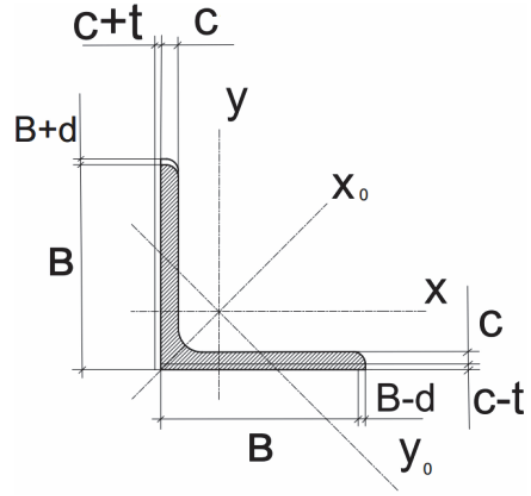


Рисунок 14. Схема геометрических допусков уголков.

линейной модели, то есть полнофакторный эксперимент обладает большой избыточностью опытов [6]. При реализации же дробной реплики от полного факторного эксперимента теряется часть информации о влиянии факторов, а именно, в дробных репликах эффекты ряда взаимодействий (в зависимости от структуры дробной реплики) приравниваются либо какому-нибудь эффекту фактора, либо ошибке эксперимента. Или иначе – эффект фактора смешивается с взаимодействием высокого порядка [6].

Необходимо сократить число опытов за счет несущественной информации для построения достоверной линейной модели, не потеряв оптимальных свойств матрицы (ортогональность, ротатабельность и прочие), то есть рассматривать часть матрицы, называемую дробной репликой. На основании анализа имеющихся данных принято решение выбрать следующие уровни и интервалы варьирования факторов (таблица 1).

В данном случае при планировании использована 1/8 реплики от полнофакторного эксперимента. В соответствии с расчетом получаем 8 опытов вместо 64. Матрица задана генерирующими соотношениями (априорно известно, что из всех групп взаимодействий наиболее значимо x_1x_2): $x_4 = x_1x_2$; $x_5 = x_2x_3$; $x_6 = x_1x_2x_3$ (таблица 2) и имеет обобщающий определяющий контраст:

$$1 = x_1x_3x_4x_5 = x_2x_4x_6 = x_1x_5x_6 = x_3x_4x_5x_6 = x_1x_3x_4 = x_2x_3x_5 = x_1x_2x_3x_6. \quad (6)$$

Получили следующую систему смешивания для 1/8 реплики от полнофакторного эксперимента:

$$\begin{aligned}
 b_1 &\rightarrow \beta_1 + \beta_{34} + \beta_{236} + \beta_{245} + \beta_{56}, \\
 b_2 &\rightarrow \beta_2 + \beta_{35} + \beta_{136} + \beta_{145} + \beta_{46}, \\
 b_3 &\rightarrow \beta_3 + \beta_{14} + \beta_{25} + \beta_{126} + \beta_{456}, \\
 b_4 &\rightarrow \beta_4 + \beta_{13} + \beta_{125} + \beta_{26} + \beta_{356}, \\
 b_5 &\rightarrow \beta_5 + \beta_{23} + \beta_{124} + \beta_{16} + \beta_{346}, \\
 b_6 &\rightarrow \beta_6 + \beta_{123} + \beta_{24} + \beta_{15} + \beta_{345}.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Таблица 1. Уровни факторов и интервалы варьирования

Факторы	Уровни			Размерность
	-1	0	+1	
x ₁	dt _{min}	0	dt _{max}	см
x ₂	db _{min}	0	db _{max}	см
x ₃	c _{min}	0	c _{max}	см
x ₄	dt _{min}	0	dt _{max}	см
x ₅	db _{min}	0	db _{max}	см
x ₅	c _{min}	0	c _{max}	см

В таблице 2: y₁, y₂, y₃, y₄ – значения продольного усилия (кгс), возникающего в верхнем уголке пояса при соответствующем сочетании факторов для типов узлов:

- «на накладках» – 160×11+160×11;
- «на накладках» 200×14+200×14;
- «телескоп» – 160×11+160×11;
- «телескоп» 200×14+200×14.

Значения коэффициентов определяются по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ij} Y_i}{N}, \tag{8}$$

где j = 0, 1...6.

Получены значения b₁ для четырех уравнений регрессии (таблица 3).

Уравнения регрессии с рассчитанными коэффициентами b₁ описывают все множество значений продольного усилия N, возникающего при любых сочетаниях данных факторов.

Для определения значимости коэффициентов необходимо найти их доверительный интервал, равный:

$$\Delta b_1 = \pm \sqrt{\frac{S_c^2}{n}} = \pm \frac{S_c}{\sqrt{n}}, \tag{9}$$

где n = 8 – количество опытов;

t – табличное значение критерия Стьюдента для пятипроцентного уровня значимости;

S_c – дисперсия воспроизводимости.

На величину дисперсии воспроизводимости влияют дисперсии следующих величин: продольных усилий в уголке пояса N, размерных допусков по толщине [-dt; 0; +dt], по ширине [-db; 0; +db], смалковки или размалковки верхнего и нижнего уголка [-dc, +dc]. Дисперсия воспроизводимости определяется для фактически обмеренных уголков (160×11, для типов узлов «на накладках» и «телескоп»). Уравнение регрессии после подстановки значений факторов примет вид: «на накладках»

$$N_1 = 69\,372,5 + 3\,088,5dt_2 + 11\,39dt_2 - 250c_2 + 250dt_1 - 250dt_1 + 250c_1; \tag{10}$$

«телескоп»

$$N_2 = 96\,599 + 1\,268,5dt_2 - 764,1dt_2 - 59c_2 - 956dt_1 + 55,3dt_1 + 105,1c_1. \tag{11}$$

Воспользовавшись свойствами дисперсии, выражение дисперсии воспроизводимости можно записать в виде:

$$S_{N_1}^2 = (3\,088,5S_{dt_2})^2 + (11\,39S_{dt_2})^2 + (250S_{c_2})^2 + (250S_{dt_1})^2 + (250S_{db_1})^2 + (250S_{c_1})^2; \tag{12}$$

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента с двумя факторами 2⁶⁻³

№	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄
1	+	+	+	+	+	+	+	73 389	57 722	122 345	96 779
2	+	-	+	+	-	+	-	66 622	53 939	111 033	90 636
3	+	+	-	+	+	-	-	71 533	55 979	117 417	93 346
4	+	-	-	+	-	-	+	54 964	58 528	106 561	89 466
5	+	+	+	-	-	-	-	73 389	57 541	122 345	95 317
6	+	-	+	-	+	-	+	66 622	54 135	111 033	89 428
7	+	+	-	-	-	+	+	71 533	60 223	117 417	100 315
8	+	-	-	-	+	+	-	64 964	54 733	106 480	91 305

Таблица 3. Коэффициенты b_1 линейной модели усилия в уголке пояса

№	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
1	69 372,5	3 088,5	1 123,9	-250	250	-250	250
2	56 598,9	1 268,5	-746,1	-59	-956,1	55,3	1 051
3	113 081	-8 200	1 107,8	1 887,5	1 237,3	1 237,3	1 262,5
4	93 368	3 103	-284,3	-642,3	-609,5	1 434,8	673

$$S_{N_2}^2 = (1268,5 Sdt_2)^2 + (761,1 Sdt_2)^2 + (59 Sc_2)^2 + (956 Sdt_1)^2 + (55,3 Sdt_1)^2 + (105 Sc_1)^2 \quad (13)$$

где Sdt_2^2 , Sdb_2^2 , Sc_2^2 , Sdt_1^2 , Sdb_1^2 , Sc_1^2 – дисперсии соответствующих факторов.

По результатам обмеров уголков (160×11 , для типов узлов «на накладках» и «телескоп») получены следующие значения дисперсий:

- дисперсия допусков по толщине $Sdt_2^2 = Sdt_1^2 = 0,676$;
- дисперсия допусков по ширине $Sdb_2^2 = Sdb_1^2 = 1$;
- дисперсия смалковки (размалковки) принята 0,1.

В результате выяснилось, что на выбор значимости фактора это не влияет $Sc_2^2 = Sc_1^2 = 0$. Зная дисперсии воспроизводимости, равные $S_{N_1}^2 = 21 200$; $S_{N_2}^2 = 1 867 042$, а также значения $t = 1 271$ критерия дисперсии воспроизводимости, находим по выражению (10) доверительные интервалы коэффициентов регрессии $\Delta b_1 = \pm 1 795$; $\Delta b_2 = \pm 1 106$. Сравнивая доверительные интервалы с коэффициентами b_1 (табл. 3), выделяем значимые:

- «на накладках» – $b_1 = 3 088,5$ и менее значимый $b_2 = 1 132,9$;
- «телескоп» – $b_1 = 12 685$ и $b_6 = 1 051$.

Коэффициенты для узла «на накладках» b_3 , b_4 , b_5 , b_6 являются незначимыми, так как их величина меньше Δb . Коэффициенты для узла «телескоп» b_3 , b_4 , b_5 также незначимы. Следовательно, допущения, принятые при выборе генерирующих соотношений верны. Окончательная форма математической модели, моделирующей несущую способность пояса в панелях со стыком уголков ($160 \times 11 + 160 \times 11$) имеет вид:

$$N_1 = 69 372,5 + 3 088,5 dt_2 + 1 139 db_2;$$

«телескоп»

$$N_2 = 96 599 + 1 268,5 dt_2 + 1 051 c_1.$$

Выводы

В панели опоры с узлом соединения уголков пояса на «накладках» на несущую способность влияет только изменение величины площади поперечного сечения уголка из-за существующей системы размерных «минусовых» допусков, а в панели опоры с узлом соединения уголков пояса типа «телескоп» на несущую способность кроме изменения геометрических размеров и площади поперечного сечения, влияет еще и «смалковка» нижнего и верхнего уголка. Также незначительно влияют допуски по толщине нижнего уголка стыка. Последние два фактора являются составными элементами значения эксцентриситета стыка. То есть в панели ствола опоры со стыковым узлом типа «телескоп» на несущую способность пояса оказывает влияние уменьшение величины площади поперечного сечения уголка из-за системы «минусовых» допусков и значения эксцентриситета как составной части коэффициента продольного изгиба φ_c пояса опоры.

Исходя из результатов исследования влияния геометрических несовершенств конструктивных элементов опоры ЛЭП на напряженно-деформированное состояние пояса опоры в районе стыка можно сформулировать требования к конструкциям на этапе изготовления. Учет изменения приведенных конструктивных параметров конструкций опоры требует проведения контроля минусового допуска толщины уголка ($-dt = 3$ мм максимальное значение) на этапе изготовления.

Также следует принимать в расчет тот факт, что «смалковка» – «размалковка», помимо уменьшения прочности и устойчивости пояса опоры, увеличивают напряжения изгиба болта соединения уголков таким образом, что напряжения изгиба почти в 8 раз превышают напряжения растяжения, что требует отдельного рассмотрения.

Литература

1. Добромыслов, А. Н. Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений / А. Н. Добромыслов. – Текст : непосредственный // Промышленное строительство. – 1990. – № 9. – С. 9–10.
2. Югов, А. М. Оценка надежности металлических конструкций на этапах жизненного цикла / А. М. Югов. – Макеевка : ДонГАСА, 2003. – 141 с. – ISBN966-7477-37-1. – Текст : непосредственный.
3. Полигон испытаний опор линий электропередач и башенных сооружений ДонНАСА / И. М. Гаранжа, Е. В. Горохов, Е. В. Шевченко [и др.]. – Текст : непосредственный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015. – № 7(34). – С. 85–98.
4. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования : издание официальное : утверждено постановлением Госстроя СССР от 14 августа 1981 г. № 144 : на замену СНиП II-B.3-72; СНиП II-II.9-62; СН 376-67 : дата введения 1982-01-01 / разработан ЦНИИСК им. Кучеренко. – Москва : Центральный институт типового проектирования, 1990. – 97 с. – Текст : непосредственный.
5. Металлические конструкции. Общий курс : учебник для ВУЗов / Е. И. Беленя, В. А. Балдин, Г. С. Ведерников [и др.] ; под ред. Е. И. Беленя. – Москва : Стройиздат, 1996. – 560 с. – Текст : непосредственный.
6. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Марков, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука. – 1976. – 279 с. – Текст : непосредственный.
7. Пособие (к СНиП II-23-81*) по проектированию стальных конструкций опор воздушных линий (ВЛ) электропередачи и открытых распределительных устройств (ОРУ) подстанций напряжением свыше 1 кВ : утверждено приказом Укрниипроектстальконструкции Госстроя СССР № 65 от 22 октября 1987 г. : введен впервые : 1990-01-01 / разработано Укрниипроектстальконструкция. – Москва : Центральный институт типового проектирования, 1989. – 71 с. – Текст : непосредственный.
8. Торбунов, С. С. Математическое моделирование и параметрическая устойчивость динамических систем с детерминированными параметрами / С. С. Торбунов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2002. – 230 с. – Текст : непосредственный.
9. ГОСТ 8509-93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент = Hot-rolled steel equal-leg angles. Dimensions : издание официальное : принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № Зот 17.02.93) : на замену ГОСТ 8509-86 : дата введения 1997-01-01 / разработан Украинским научно-исследовательским институтом металлов. – Москва : Издательство стандартов, 1996. – 16 с. – Текст : непосредственный.
10. Донецкий завод высоковольтных опор. – Текст : электронный // Реестр предприятий Украины :

References

1. Dobromyslov, A. N. Analysis of accidents of industrial buildings and engineering structures. – Text : direct. – In: *Industrial engineering*. – 1990. – № 9. – P. 9–10. (in Russian)
2. Yugov, A. M. Assessment of the reliability of metal structures at the stages of the life cycle. – Makeevka : DSACEA, 2003. – 141 p. – ISBN966-7477-37-1. – Text : direct. (in Russian)
3. Garanzha, I. M.; Gorokhov, Ye. V.; Shevchenko, Ye. V. [et. al.]. Test site for power line supports and tower structures DNACA. – Text : direct. – In: *Construction of unique buildings and structures*. – 2015. – № 7(34). – P. 85–98. (in Russian)
4. SNiP II-23-81*. Steel structures. Design standards. – Moscow : Central Institute for Typical Design, 1990. – 97 p. – Text : direct. (in Russian)
5. Belenya, Ye. I.; Baldin, V. A.; Vedernikov, G. S. [et. al.] ; edited by Belenya, Ye. I. Metal constructions. General course: textbook for universities. – Moscow : Stroizdat, 1996. – 560 p. – Text : direct. (in Russian)
6. Adler, Yu. P.; Markov, Ye. V.; Granovsky, Yu. V. Planning an experiment when searching for optimal conditions. – Moscow : Science. – 1976. – 279 p. – Text : direct. (in Russian)
7. Manual (to SNiP II-23-81*) for the design of steel structures for overhead transmission line (OHL) supports and open switchgear (OSG) substations with voltage over 1 kV. – Moscow : Central Institute for Typical Design, 1989. – 71 p. – Text : direct. (in Russian)
8. Torbunov, S. S. Mathematical modeling and parametric stability of dynamic systems with deterministic parameters. – Tomsk : Publishing house TPU, 2002. – 230 p. – Text : direct. (in Russian)
9. GOST 8509-93. Hot-rolled steel equal-leg angles. Dimensions. – Moscow : Publishing house of standards, 1996. – 16 p. – Text : direct. (in Russian)
10. Donetsk plant of high-voltage towers. – Text : electronic. – In: *Register of enterprises of Ukraine*: [website]. – 2020. – URL: <https://www.ua-region.info/33135718> (date of the application: 16.03.2021). (in Russian)
11. Electrical installation rules. – 7-th ed. – Moscow : Energoatomizdat, 2002. – 115 p. – Text : direct. (in Russian)
12. Trofimov, V. I. Investigation of the stability and bearing capacity of metal structures such as transmission towers. – Moscow-Leningrad : Gosenergoizdat, 1963. – 320 p. – Text : direct. (in Russian)
13. Perelmuter, A. V.; Slivker, V. I. Calculation models of structures and the possibility of their analysis. – Kiev : Steel, 2005. – 618 p. – Text : direct. (in Russian)
14. ANSI /ASCE 10-90. Design of Latticed Steel Transmission Structures. – New York : ASCE, 1992. – 64 p. – Text : direct. (in English)
15. IEC 60826. Design criteria of overhead transmission lines. – Third Edition. – Geneva, Switzerland :

- [сайт]. – 2020. – URL: <https://www.ua-region.info/33135718> (дата обращения: 16.03.2021).
11. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. : утверждено Министерством энергетики Российской Федерации, приказ от 8 июля 2002 г. № 204 : введен впервые : дата введения 2003-01-01 / подготовлено ОАО «ВНИИЭ». – Москва : Энергоатомиздат, 2002. – 115 с. – Текст : непосредственный.
 12. Трофимов, В. И. Исследование устойчивости и несущей способности металлических конструкций типа опор электропередачи / В. И. Трофимов. – Москва-Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. – 320 с. – Текст : непосредственный.
 13. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев : Сталь, 2005. – 618 с. – Текст : непосредственный.
 14. ANSI /ASCE 10-90. Design of Latticed Steel Transmission Structures . – New York : ASCE, 1992. – 64 p. – Текст : непосредственный.
 15. IEC 60826. Design criteria of overhead transmission lines. – Third Edition. – Geneva, Switzerland : International Electrotechnical Commission, 2003. – 241 p. – Текст : непосредственный.
 16. Dutta, S.R.K. New algorithms for constrained minimax optimization / S. R. K. Dutta, M. Vidyasagar. – Текст : непосредственный // *Mathematical Programming*, 1977. – Volume 13, Issue 1. – P. 140–155.
 17. Ozono, S. Characteristics of in-plane free vibration of transmission line systems / S. Ozono, J. Maeda, M. Makino. – Текст : непосредственный // *Engineering Structures*. – 1988. – Vol. 10(4). – P. 272–280.
 18. Ghunal, Y. M. Analysis and Design of Three and Four Legged 400 KV Steel Transmission Line Towers: Comparative Study / Y. M. Ghunal, U. S. Salunkhe. – Текст : непосредственный // *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. – 2011. – Vol. 04, №. 06. – P. 691–694.
 - International Electrotechnical Commission, 2003. – 241 p. – Text : direct. (in English)
 16. Dutta, S.R.K.; Vidyasagar, M. New algorithms for constrained minimax optimization. – Text : direct. – In: *Mathematical Programming*, 1977. – Volume 13, Issue 1. – P. 140–155. (in English)
 17. Ozono, S.; Maeda, J.; Makino, M. Characteristics of in-plane free vibration of transmission line systems. – Text : direct. – In: *Engineering Structures*. – 1988. – Vol. 10(4). – P. 272–280. (in English)
 18. Ghunal, Y. M.; Salunkhe, U. S. Analysis and Design of Three and Four Legged 400 KV Steel Transmission Line Towers: Comparative Study. – Text : direct. – In: *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. – 2011. – Vol. 04, №. 06. – P. 691–694. (in English)

Горохов Евгений Васильевич – доктор технических наук, профессор, президент ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», заведующий кафедрой металлических конструкций и сооружений. Иностраный член Российской Академии архитектуры и строительных наук, академик Академии Высшей школы и Академии строительства Украины, Член Международного комитета по изучению воздействия ветра на здания и сооружения. Научные интересы: эксплуатационная надежность строительных металлических конструкций, климатические нагрузки на строительные конструкции.

Васылев Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент; профессор кафедры металлических конструкций и сооружений, начальник Лаборатории испытаний строительных конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: экспериментально-теоретическое исследование работы опор линий электропередачи; регулирование и учет внутренне-го напряженного состояния горячекатаного проката в строительных конструкциях.

Гаврилов Валерий Георгиевич – технический директор ООО «ГПК ИНЖИНИРИНГ». Научные интересы: экспериментально-теоретическое исследование работы опор линий электропередачи, строительных конструкций и сооружений; технология изготовления строительных конструкций.

Танасогло Антон Владимирович - кандидат технических наук, доцент кафедры металлических конструкций и сооружений ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: эксплуатационная надежность и оптимальное проектирование конструкций воздушных линий электропередачи и антенных опор, изучение действительной работы металлических решетчатых конструкций башенного типа.

Игнатенко Роман Иванович – ассистент кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: технология монтажа металлических решетчатых башенных опор ЛЭП, экспериментально-теоретическое исследование работ опор линий электропередач.

Горохов Євген Васильович – доктор технічних наук, професор, президент ДООУ ВПО "Донбаська національна академія будівництва і архітектури", завідувач кафедри металевих конструкцій і споруд. Іноземний член Російської Академії архітектури і будівельних наук, академік Академії Вищої школи і Академії будівництва України, Член Міжнародного комітету з вивчення впливу вітру на будівлі і споруди. Наукові інтереси: експлуатаційна надійність будівельних металевих конструкцій, кліматичні навантаження на будівельні конструкції.

Василев Володимир Миколайович – кандидат технічних наук, доцент; професор кафедри металевих конструкцій та споруд, начальник Лабораторії випробувань будівельних конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: експериментально-теоретичне дослідження роботи опор ліній електропередавання; регулювання і врахування внутрішнього напруженого стану гарячекатаного прокату в будівельних конструкціях.

Гаврилов Валерій Гергійович – технічний директор ТОВ «ГПК ІНЖИНІРИНГ». Наукові інтереси: експериментально-теоретичне дослідження роботи опор ліній електропередачі, будівельних конструкцій і споруд; технологія виготовлення будівельних конструкцій.

Танасогло Антон Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих конструкцій і споруд ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: експлуатаційна надійність і оптимальне проектування конструкцій повітряних ліній електропередавання та антенних опор, вивчення дійсної роботи металевих ґратчастих конструкцій баштового типу.

Игнатенко Роман Иванович – асистент кафедри ехнології і організації будівництва ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: технологія монтажу металевих ґратчастих баштових опор ЛЕП, експериментально-теоретичне дослідження робіт опор ліній електропередавання.

Gorokhov Yevgen – D.Sc. (Engineering), Professor; President of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, the Head of the Metal Structures and Constructions Department. Foreign member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, academician of the Academy of Higher Education and the Academy of Civil Engineering of Ukraine, Member of the International Committee of study of wind effects on buildings and structures. Scientific interests: operational reliability of building metal structures, climatic loads on building structures.

Vasylev Volodymyr – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Metal Structures and Constructions Department, Head of the Laboratory of Testing Building Structures and Buildings, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: experimental and theoretical investigation of power transmission tower operation, control and record of the inner stressed state of the hot rolled metal in building structures.

Tanasoglo Anton – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Metal Structures and Constructions Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: operational reliability and optimal design of overhead power transmission line and antenna support structures, studying of the valid work of metal lattice tower supports.

Gavrilov Valery – Technical Director of LLC «GPK ENGINEERING». Scientific interests: experimental and theoretical study of the operation of power transmission line supports, building structures and structures; technology for the manufacture of building structures.

Ignatenko Roman – Assistant, Technology and Organization of Building Department, Donbas National academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: technology of installation of metal lattice towers for power transmission lines, experimental and theoretical research of the work of power transmission line supports.