



Регрессионный анализ напряженно-деформированного состояния металлических многогранных стоек

И. М. Гаранжа¹

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, 86100, Украина, Донецкая область, Макеевка, улица Державина, 2.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 624.014.2:621.771

История

Подана в редакцию 14 мая 2013
Оформлена 30 ноября 2013
Согласована 30 ноября 2013

Ключевые слова

металлические многогранные стойки;
напряженно-деформированное состояние;
регрессионный анализ;
факторы влияния;
коэффициенты значимости факторов;
матрица планирования;
дисперсия воспроизводимости.

АННОТАЦИЯ

В статье установлен уровень влияния изменчивости основных конструктивных параметров отдельно стоящих металлических многогранных стоек на их напряженно-деформированное состояние, что дает возможность выполнения их тщательного входного и текущего контроля при изготовлении конструкций.

В качестве вышеперечисленных параметров приняты толщина стенки стойки $t_{ст} \pm \Delta t$, диаметр в комле стойки $d_k \pm \Delta d$ и нахлест телескопического соединения секций стоек $h_{Нр} \pm \Delta h$. Получены уравнения регрессии для напряженно-деформированного состояния металлической десятигранной стойки.

Предложены рекомендации для заводов-изготовителей, которые заключаются в обязательном выполнении входного контроля минусового допуска толщины металлического лист ($-\Delta t = 5\%$ от номинальной t) независимо от геометрических параметров стоек и текущего контроля их диаметров в комле ($-\Delta d = 5...10$ мм) на этапе изготовления.

Содержание

- | | | |
|----|---|----|
| 1. | Выделение не разрешимых ранее частей общей проблемы и анализ последних исследований | 12 |
| 2. | Цель работы | 12 |
| 3. | Регрессионный анализ НДС многогранных стоек | 12 |
| 4. | Выводы и рекомендации | 17 |

Конструкции многогранных гнутых стоек (МГС), независимо от своего назначения в качестве строительных конструкций, являются новыми на территории СНГ. Изучение действительной работы МГС под нагрузкой, а вследствие и напряженно-деформированного состояния (НДС), несомненно, является важным аспектом для их широкого распространения не только в нашей стране, но и за рубежом. Важно отметить, что результативная база, полученная при исследованиях работы данных конструкций, является незаменимым фактором при их создании. Поэтому вопрос качественного изготовления конструкций, основанного на результатах регрессионного анализа НДС многогранных стоек, безусловно, актуален [18, 20 - 28].

1. Выделение не разрешимых ранее частей общей проблемы и анализ последних исследований

МГС, особенно применимо к опорам воздушных линий (ВЛ), являются малоизученными листовыми металлическими конструкциями в областях изготовления, расчета и эксплуатации. Отсутствие нормативной документации по вышеупомянутым направлениям еще более подчеркивает значимость исследований по изучению НДС данных конструкций. В связи с этим возникает актуальный вопрос о создании необходимой нормативной базы для воплощения в жизнь проектов, связанных с применением МГС [2, 4, 10, 19].

НДС подобных конструкций цилиндрического и коробчатого сечения, описывается в работах [2 - 6], а расчету фланцевых соединений стоек уделяется внимание в работах [3, 7 - 9].

2. Цель работы

Целью данной работы ставится анализ уровня влияния изменчивости основных параметров конструктивной формы на напряженно-деформированное состояние отдельно стоящих металлических многогранных стоек с последующей выдачи рекомендаций выдачей рекомендаций для заводов изготовителей.

3. Регрессионный анализ НДС многогранных стоек

Стальные многогранные стойки представляют собой конические трубы коробчатого многогранного сечения, изготавливаемые изгибом стального листа с последующим свариванием его краев на ребре или грани. Высота стойки h достигает 80м с толщиной стенки до 20мм, диаметр в комле стойки d_k варьируется в пределах 250...3000мм, диаметр верха стойки – в пределах 200...500мм [4, 20].

В Украине многогранные опоры ещё не получили широкого распространения. Еще в 90-х годах прошлого столетия незначительный опыт имелся в строительстве многогранных опор с фланцевым соединением секций и оттяжками для воздушных линий класса напряжения 110-330кВ. Но такая конструкция не имела перспектив широкого применения, в первую очередь из-за технической сложности, трудоемкости и дороговизны изготовления. Но на сегодняшний день эта проблема в полной мере решена, и технология изготовления МГС полностью освоена. Передовыми организациями в этом направлении являются ЗАО «Домодедовский завод металлических конструкций «МЕТАКО» (Московская область, Российская Федерация) и ЧАО «Авдеевский завод металлических конструкций» (Донецкая область, Украина).

Анализ конструктивных особенностей металлических МГС и условия работы таких конструкций под нагрузкой показал, что основными факторами, влияющими на напряженно-деформированное состояние стоек, являются изменчивость их конструктивных параметров (в дальнейшем изменчивость факторов), таких как [17, 19]:

- толщина стенки стойки, $t_{ст}$;
- диаметр в комле стойки, d_k ;
- отметка приложения нагрузки, $h_{Нр}$ (нахлест секций стоек в телескопическом стыке).

В качестве рассматриваемых параметров НДС приняты значения внутренних меридиональных растягивающих напряжений $\sigma_{ураст}$, возникающих в приопорной зоне МГС и перемещения верха стойки f_b .

Из всех возможных сочетаний конструктивных параметров металлических многогранных стоек с помощью методов планирования эксперимента [13, 14] можно определить уровень влияния одного или другого на НДС стоек и выявить эффект их взаимодействия.

Так как в расчете металлических конструкций интерес представляют две группы предельных состояний [1], то при выполнении регрессионного анализа влияния конструктивных параметров стоек в качестве откликов в уравнениях линейной регрессии принимаем меридиональные растягивающие напряжения $\sigma_{ураст}$. (1-я группа предельных состояний) в припорной зоне стойки и перемещения верха стойки, f (2-я группа предельных состояний) (см. рисунок 1). Функции откликов будут иметь вид (1-2):

$$\sigma_{ураст} = f(t_{ст}, d_k, h_{Np}) \quad (1)$$

$$f_e = f(t_{ст}, d_k, h_{Np}) \quad (2)$$

где $t_{ст}$ – толщина стенки стойки (фактор X1);

d_k – диаметр в комле (в основании) стойки (фактор X2);

h_{Np} – отметка приложения нагрузки или нахлест секций стоек в телескопическом стыке (фактор X3).

Все перечисленные факторы отвечают требованиям [7 - 9] как к каждому в отдельности, так и к их совокупности (сочетаниям):

- наличие области определения факторов ($\Phi \pm \Delta\Phi$);
- управляемость факторов;
- однозначность факторов;
- совместимость факторов;
- отсутствие корреляции между факторами (независимость факторов).

Анализ схем исследуемых конструкций МГС показал, что в процессе численного эксперимента регулирования уровня внутренних напряжений и перемещений можно выполнять за счет изменения номинальных значений факторов $\delta_{ст} \pm \Delta\delta$, $\varnothing_k \pm \Delta\varnothing$, $h_{Np} \pm \Delta h$, значимость влияния которых на конечный результат и определяется.

Выражаем меридиональные растягивающие напряжения в припорной зоне стойки $\sigma_{ураст}$ и перемещения крайних верхних точек f_e в виде полного уравнения линейной регрессии (алгебраического полинома первой степени) (3):

$$\sigma_{ураст}(f_e) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad (3)$$

где b_i – коэффициенты полинома (коэффициенты линейных моделей);

x_i – значения факторов в кодовом выражении [12 - 16].

Взаимосвязь анализируемых параметров прослежена на основе численных исследований серии натуральных конструкций десятигранных стоек (см. рисунок 1) жестко заземленных в основании сварным швом крепления к базе, выполненных из стали марки С245. Конструктивные параметры стоек (с их допусками), а также расчетные нагрузки приведены в таблице 1.

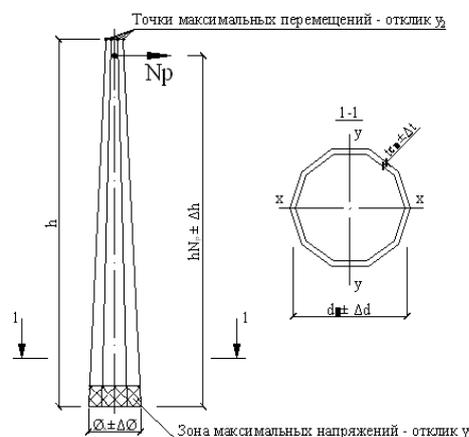


Рисунок 1. Геометрическая схема десятигранных стоек с отображением исследуемых факторов

Таблица 1. Конструктивные параметры исследуемых стоек с их допусками

Марка стойки	h, м	dk ± Δd, мм	tct ± Δt, мм	hNp ± Δh, м	Np, кН
1	2	3	4	5	6
МГС-1	7,5	350±5	6±0,3	7±0,1	20
МГС-2	10,0	500±5	7±0,35	9,5±0,1	30
МГС-3	15,2	750±6	8±0,4	14,7±0,2	45
МГС-4	20,0	1000±8	9±0,45	19,5±0,3	70
МГС-5	24,6	1100±8	9±0,45	24±0,4	70
МГС-6	30,3	1200±9	10±0,5	29,8±0,4	75
МГС-7	36,4	1300±10	12±0,6	35,9±0,5	90
МГС-8	40,5	1400±10	12±0,6	40±0,5	95

По численным значениям b_i определяют уровень влияния изменчивости соответствующих факторов на НДС конструкций. Формулы (4-6) для определения коэффициентов b_i [13 - 15] имеют вид:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (4)$$

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i}{N} \quad (5)$$

$$b_i = b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ui} x_{ji} \cdot y_i}{N} \quad (6)$$

где $u, j = 1, 2, \dots, k$ – номера факторов ($u \neq j$);

N – количество опытов;

i – номера опытов.

В таблицах 2 и 3 приведены значения коэффициентов b_i на примере конструкции МГС-2.

Таблица 2. Значения коэффициентов регрессии для растягивающих напряжений $\sigma_{ураст}$.

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
227,44	-11,44	-4,46	2,74	0,213	-0,138	-0,063	0,013

Таблица 3. Значения коэффициентов регрессии для перемещений края стойки f_b .

b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
190,53	-9,53	-6,40	4,01	0,319	-0,201	-0,144	0,006

Интервал варьирования факторов приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения факторов на среднем уровне варьирования и интервалы варьирования факторов*

Исследуемые конструкции	X_1 , мм	ΔX_1 , мм	X_2 , мм	ΔX_2 , мм	X_3 , мм	ΔX_3 , мм
10-гранные металлические стойки	6	0,3	350	5	7000	50

*где $\Delta X_1 = \Delta t_{ст}$ – интервал варьирования толщины стенки стойки опоры;

$\Delta X_2 = \Delta d_k$ – интервал варьирования диаметра в комле стойки опоры;

$\Delta X_3 = \Delta h_{Np}$ – интервал варьирования отметки приложения нагрузки.

Данный численный эксперимент является «полным факторным экспериментом», так как в нём реализуются все возможные сочетания уровней факторов.

Число опытов (численных расчетов), необходимых для реализации всех возможных сочетаний факторов, определяется по формуле (7) [12 - 15, 19]:

$$N = m^k \quad (7)$$

где $m = 2$ – число уровней варьирования факторов;

$k = 3$ – число факторов.

Таким образом, $N = 2^3 = 8$.

С целью определения уровня влияния (значимости) найденных коэффициентов b_i находим их доверительный интервал. Значимыми коэффициентами полиномов будут только те, которые превышают доверительный интервал, определяемый по формуле (8):

$$\Delta b_i = \pm f \sqrt{\frac{S_{\sigma}^2}{N}} \quad (8)$$

где $N = 8$ – число опытов (вариантов расчета);

f – табличное значение коэффициента Стьюдента для 5% уровня значимости ($P = 0,95$);

S_{σ}^2 – дисперсия воспроизводимости.

На дисперсию воспроизводимости влияют дисперсии следующих величин:

- внутренних растягивающих напряжений S_{σ}^2 ;
- перемещений крайних верхних точек конструкции S_t^2 ;
- толщины стенки стойки S_t^2 ;
- диаметра в комле стойки S_d^2 ;
- отметки приложения нагрузки S_h^2 .

Матрицы планирования численного эксперимента по двум группам предельных состояний (максимальные растягивающие напряжения и перемещения крайних верхних точек конструкции) приведены в таблице 5.

Таблица 5. План (матрица планирования) и результаты численного эксперимента на конструкции восьмигранной опоры

№ опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	$\sigma_y^{раст.}$, МПа	f_B , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	+	+	-	-	-	-	+	+	217,6	183,1
2	+	-	+	-	-	+	-	+	231,4	189,3
3	+	-	-	+	+	-	-	+	246,5	211,1
4	+	+	+	+	+	+	+	+	214,3	178,6
5	+	-	-	-	+	+	+	-	240,6	202,4
6	+	+	+	-	+	-	-	-	209,2	171,2
7	+	+	-	+	-	+	-	-	222,9	191,0
8	+	-	+	+	-	-	+	-	237,0	197,4

Прим. «+» - верхний уровень варьирования факторов, «-» - нижний уровень варьирования факторов.

Правильность составления матрицы планирования эксперимента определяется соблюдением следующих условий для полного факторного эксперимента 2^3 :

- симметричность относительно центра эксперимента, т.е. $\sum_{i=1}^N x_{ji} = 0$, где, $j = 1, 2, \dots, k$ – номер фактора, N - число опытов;
- условие нормировки $\sum_{i=1}^N x_{ji}^2 = N$;
- ортогональность матрицы планирования $\sum_{i=1}^N x_{ji} x_{ui} = 0$, где $j, u = 1, 2, \dots, k$; $j \neq u$.

Дисперсии факторов эксперимента определяем по формуле (9) [12-14]:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \quad (9)$$

где, $\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}$ - среднее арифметическое результатов измерений значений факторов;

n – число измерений.

Дисперсии факторов определены из рядов случайных величин, полученных путем многократных измерений толщин листового проката и диаметров в комле готовых конструкций и нахлестов телескопических стыков МГС.

Дисперсия S_h^2 определялась на основании линейки возможных отметок приложения нагрузки N_p к опоре.

Рассмотрим алгоритм составления полного уравнения линейной регрессии на примере исследуемой стойки МГС-2 (см. таблицу 5).

Согласно формуле (9) получаем дисперсии факторов: $S_t^2 = 0,017$, $S_d^2 = 4,9$, $S_h^2 = 698,9$.

Для определения дисперсии воспроизводимости дисперсии факторов переведены в размерность откликов, приняв допущение о незначимости коэффициентов полинома при взаимодействиях факторов, а затем суммированы. Уравнения регрессии после расшифровки значений факторов принимают вид (10-11):

$$\sigma_{ycm}^{расч} = 227,44 - 11,44t - 4,46d + 2,74h \quad (10)$$

$$f_{\sigma} = 190,53 - 9,53t_{cm} - 6,4d_k + 4,1h_{Np} \quad (11)$$

Воспользовавшись свойствами дисперсии, выражение дисперсий воспроизводимости запишется в виде (12-13):

$$S_{\{\sigma\}}^2 = (43,5 \cdot S_t)^2 + (0,88 \cdot S_d)^2 + (0,0028 \cdot S_h)^2 \quad (12)$$

$$S_{\{f\}}^2 = (46 \cdot S_t)^2 + (2,18 \cdot S_d)^2 + (0,068 \cdot S_h)^2 \quad (13)$$

Зная дисперсии воспроизводимости, равные $S_{\{\sigma\}}^2 = 23,085$ и $S_{\{f\}}^2 = 22,108$, а также значение коэффициента Стьюдента $f = 2,3646$ [12 - 14], определенного для степеней свободы $N - 1 = 8 - 1 = 7$ каждой из дисперсий толщины стенки S_t^2 , диаметра в комле S_d^2 , и отметки приложения нагрузки S_h^2 , определяем по выражению (8) доверительный интервал коэффициентов полинома.

Получены $\Delta b_{\sigma} = \pm 2,698$ и $\Delta b_{f} = \pm 3,898$.

Сравнивая доверительный интервал с коэффициентами b_i (см. таблицы 2, 3) определяем уровни влияния факторов на НДС стоек. Коэффициенты взаимодействия факторов X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 и $X_1X_2X_3$ не оказывают влияния на НДС стоек, так как они меньше Δb . Следовательно, допущения, принятые при формировании выражений (10) и (11), верны.

По результатам анализа факторов установлено, что параметр толщины стенки стойки $t_{ст}$ при данном диапазоне варьирования оказался влиятельным на параметры НДС для всех рассматриваемых стоек, причем с увеличением их геометрических параметров его значимость растет для напряжений и снижается для перемещений. Параметр диаметра в комле стоек d_k с его диапазоном варьирования значим по напряжениям для стоек высотой $h \leq 10$ м, а по перемещениям – $h \leq 30$ м. Влияние третьего параметра hN_p со своим диапазоном варьирования аналогично параметру диаметра d_k .

Окончательно уравнения регрессии для напряженно-деформированного состояния металлической десятигранной стойки МГС-2 принимают вид (14-15):

$$\sigma_y^{раст} = 227,44 - 11,44t_{ст} - 4,46d_k + 2,74h_{Np} \quad (14)$$

$$f_{\sigma} = 190,53 - 9,53t_{ст} - 6,4d_k + 4,1h_{Np} \quad (15)$$

Уравнения регрессии для остальных стоек получены по аналогичной методике.

В таблице 6 приведены уровни влияния основных конструктивных параметров рассматриваемых конструкций МГС с их минусовыми допусками на напряженно-деформированное состояние.

Таблица 6. Уровень влияния основных конструктивных параметров на НДС стоек*

Марка стойки	Высота, h, м	$\sigma_{ном}$, МПа	$\sigma(-)$, МПа	$f_{ном}$, МПа	$f(-)$, МПа	$\Delta\sigma$, %	Δf , %
1	2	3	4	5	6	7	8
МГС-1	7,5	216,4	227,1	131,4	191,6	4,7	31,4
МГС-2	10,0	223,3	240,6	145,7	202,4	7,2	28,0
МГС-3	15,2	193,7	215,9	267,5	352,5	10,3	24,1
МГС-4	20,0	188,2	222,5	418,1	524,6	15,4	20,3
МГС-5	24,6	184,2	225,7	646,1	781,2	18,4	17,3
МГС-6	30,3	181,6	231,6	1018,7	1179,1	21,6	13,6
МГС-7	36,4	166,0	221,0	1264,8	1402,2	24,9	9,8
МГС-8	40,5	171,4	235,5	1617,7	1730,2	27,2	6,5

Прим. $\sigma(-)$, $f(-)$ – соответственно значения напряжений и перемещений стоек при минусовых допусках основных конструктивных параметров.

4. Выводы и рекомендации

Рекомендации по учету изменчивости основных конструктивных параметров при изготовлении конструкций МГС состоят в обязательном проведении входного контроля минусового допуска толщины металлического листа ($-\Delta t = 5\%$ от номинальной t) не зависимо от геометрических параметров стоек и текущего контроля их диаметров в комле ($-\Delta d = 5...10$ мм) на этапе изготовления.

Допуск нахлеста телескопических стыков секций многогранных стоек должен находиться в пределах $hN_p = \pm 200$ мм, особенно для стоек, используемых для пор воздушных линий электропередачи.

Результаты анализа влияния изменчивости основных конструктивных параметров на напряженно-деформированное состояние металлических многогранных стоек внедрены в проектирование и изготовление конструкций МГС на ЧАО «Авдеевский завод металлических конструкций» (Донецкая область, Украина).

Литература

1. ДБН В.2.6 – 163:2010 Стальные конструкции. Нормы проектирования, изготовления и монтажа.
2. Гаранжа И. М., Васылев В. Н. Эффективность применения многогранных гнутых стоек для опор воздушных линий электропередачи в условиях современной // Металеві конструкції. 2008. Т. 14. № 3. С. 163-168.
3. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. К.: Сталь, 2005. 618 с.
4. Материалы I-IV международных конференций «Многогранные гнуты стойки». Кременец (Николаевка): 2006 – 2009. 370 с.
5. Лессиг Е. Н., Лилеева А. Ф., Соколов А. Г. Листовые металлических конструкции. М: Издательство литературы по строительству, 1970. 488 с.

6. Пособие по проектированию стальных конструкций опор воздушных линий (ВЛ) электропередачи и открытых распределительных устройств (ОРУ) подстанций напряжением выше 1кВ (к СНиП II-23-81*). М.: Энергосетьпроект Минэнерго СССР, 1989. 72 с.
7. Бирбер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 367 с.
8. Зинкевич О. Н. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 539 с.
9. Иосилевич Г. Б., Ковган С. Т., Лукашук Ю. В. Общий метод расчета фланцевый соединений. М.: Вестник машиностроения, 1980. С. 77-86.
10. Гунгер Ю. Р., Пивчик И. Р. Разработка новых конструкций опор ВЛ из гнутых металлических профилей нетрадиционных форм // Электрические станции, 2003. №3. С. 48-50.
11. Васылев В. Н., Гаранжа И.М. Особенности построения расчетной конечно-элементной модели многогранных гнутых стоек в программно-вычислительном комплексе SCAD Office // Макеевка: Металеві конструкції, 2009. Т.15. № 2. С. 18–29.
12. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. М.: Металлургия, 1969. 114 с.
13. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
14. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. К.: Наука, 1971. 246 с.
15. Яноши Л. Теория и практика обработки результатов измерений. М.: Мир, 1968. 202 с.
16. Нейман Ю. А. Вводный курс теории вероятностей и математической статистики. М.: Наука, 1968. 164 с.
17. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент: ГОСТ 19903-74.
18. Dicleli M. Computer-aided optimum design of steel tubular telescopic pole structures // Computers & Structures. 1997. Vol. 62. Issue 6. Pp. 961-973.
19. Гаранжа І. М. Напружено-деформований стан металевих багатограних стояків з урахуванням особливостей вітрового впливу : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к.т.н.: Спец. 05.23.01. Макіївка: / Донбаська національна академія будівництва і архітектури. 2012. С. 17–18.
20. Pagnini L. C, Solari G. Damping measurements of steel poles and tubular towers // Engineering Structures. 2001. Vol. 23. Issue 9. Pp. 1085-1095.
21. Gonçalves R., Camotim D. On the behaviour of thin-walled steel regular polygonal tubular members // Thin-Walled Structures. 2013. Vol. 62. Pp. 191-205.
22. Gonçalves R. A geometrically exact approach to lateral-torsional buckling of thin-walled beams with deformable cross-section // Computers & Structures. 2012. Vol. 106–107. Pp. 9-19.
23. Andreassen M. J., Jönsson J. A distortional semi-discretized thin-walled beam element // Thin-Walled Structures. 2013. Vol. 62. Pp. 142-157.
24. Ao-yu Jiang, Ju Chen, Wei-liang Jin. Experimental investigation and design of thin-walled concrete-filled steel tubes subject to bending // Thin-Walled Structures. 2013. Vol. 63. Pp. 44-50.
25. Ranzi G., Luongo A. A new approach for thin-walled member analysis in the framework of GBT // Thin-Walled Structures. 2011. Vol. 49. Issue 11. Pp. 1404-1414.
26. Łagoda T., Robak G., Słowik J. Fatigue life of steel notched elements including the complex stress state // Materials & Design. 2013. Vol. 51. Pp. 935-942.
27. Experimental characterization and numerical modeling of micromechanical damage under different stress states / Achouri M., Germain G., Dal Santo Ph., Saidane D. // Materials & Design. 2013. Vol. 50. Pp. 207-222.
28. Barsoum I., Faleskog J., Pingle S. The Influence of the Lode Parameter on Ductile Failure Strain in Steel // Procedia Engineering. 2011. Vol. 10. Pp. 69-75.

References

1. DBN V.2.6 – 163:2010 Stalnyye konstruksii. Normy proyektirovaniya, izgotovleniya i montazha.(rus)
2. Garanzha I. M., Vasylev V. N. Effektivnost primeneniya mnogogrannykh gnutykh stoyek dlya opor vozduzhnykh liniy elektropredachi v usloviyakh sovremennoy // Metalevi konstruksii. 2008. T. 14. № 3. S. 163-168. (rus)
3. Perelmuter A. V., Slivker V. I. Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnost ikh analiza. K.: Stal, 2005. 618 s. (rus)
4. Materialy I-IV mezhdunarodnykh konferentsiy «Mnogogrannyye gnuty stoyki». Kremenets (Nikolayevka): 2006 – 2009. 370 s. (rus)

5. Lessig Ye. N., Lileyeva A. F., Sokolov A. G. *Listovyye metallicheskih konstruksii*. M.: Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1970. 488 s. (rus)
6. *Posobiye po proyektirovaniyu stalnykh konstruksiy opor vozduzhnykh liniy (VL) elektroperedachi i otkrytykh raspredelitelnykh ustroystv (ORU) podstantsiy napryazheniyem vyshe 1kV (k SNiP II-23-81*)*. M.: Energosetproyekt Minenergo SSSR, 1989. 72 s. (rus)
7. Birber I. A., Iosilevich G. B. *Rezbovyye i flantsevyye soyedineniya*. M.: Mashinostroyeniye, 1990. 367 s. (rus)
8. Zinkevich O. N. *Metod konechnykh elementov v tekhnike*. M.: Mir, 1975. 539 s. (rus)
9. Iosilevich G. B., Kovgan S. T., Lukashchuk Yu. V. *Obshchiy metod rascheta flantsevyiy soyedineniy*. M.: Vestnik mashinostroyeniya, 1980. S. 77-86. (rus)
10. Gunger Yu. R., Pivchik I. R. *Razrabotka novykh konstruksiy opor VL iz gnutykh metallicheskih profiley netraditsionnykh form // Elektricheskiye stantsii, 2003. №3. S. 48-50*. (rus)
11. Vasylev V. N., Garanzha I.M. *Osobennosti postroyeniya raschetnoy konechno-elementnoy modeli mnogogrannykh gnutykh stoyek v programmno-vychislitelnom komplekse SCAD Office // Makeyevka: Metalevi konstruksii, 2009. T.15. № 2. S. 18-29*. (rus)
12. Adler Yu. P. *Vvedeniye v planirovaniye eksperimenta*. M.: Metallurgiya, 1969. 114 s. (rus)
13. Adler Yu. P., Markova Ye. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy*. M.: Nauka, 1976. 279 s. (rus)
14. Fedorov V. V. *Teoriya optimalnogo eksperimenta*. K.: Nauka, 1971. 246 s. (rus)
15. Yanoshi L. *Teoriya i praktika obrabotki rezultatov izmereniy*. M.: Mir, 1968. 202 s. (rus)
16. Neyman Yu. A. *Vvodnyy kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki*. M.: Nauka, 1968. 164 s. (rus)
17. *Prokat listovoy goryachekatanyy. Sortiment: GOST 19903-74*. (rus)
18. Dicleli M. Computer-aided optimum design of steel tubular telescopic pole structures // *Computers & Structures*. 1997. Vol. 62. Issue 6. Pp. 961-973.
19. Garanzha I. M. *Napruzhenno-deformovaniy stan metalevikh bagatogrannykh stoyakiv z urakhuvannyam osoblivostey vitrovogo vplivu : avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya k.t.n.: Spets. 05.23.01. Makiivka: / Donbaska natsionalna akademiya budivnitstva i arkhitekturi. 2012. S. 17-18*. (ukr)
20. Pagnini L. C., Solari G. Damping measurements of steel poles and tubular towers // *Engineering Structures*. 2001. Vol. 23. Issue 9. Pp. 1085-1095.
21. Gonçaves R., Camotim D. On the behaviour of thin-walled steel regular polygonal tubular members // *Thin-Walled Structures*. 2013. Vol. 62. Pp. 191-205.
22. Gonçaves R. A geometrically exact approach to lateral-torsional buckling of thin-walled beams with deformable cross-section // *Computers & Structures*. 2012. Vol. 106-107. Pp. 9-19.
23. Andreassen M. J., Jönsson J. A distortional semi-discretized thin-walled beam element // *Thin-Walled Structures*. 2013. Vol. 62. Pp. 142-157.
24. Ao-yu Jiang, Ju Chen, Wei-liang Jin. Experimental investigation and design of thin-walled concrete-filled steel tubes subject to bending // *Thin-Walled Structures*. 2013. Vol. 63. Pp. 44-50.
25. Ranzi G., Luongo A. A new approach for thin-walled member analysis in the framework of GBT // *Thin-Walled Structures*. 2011. Vol. 49. Issue 11. Pp. 1404-1414.
26. Łagoda T., Robak G., Słowik J. Fatigue life of steel notched elements including the complex stress state // *Materials & Design*. 2013. Vol. 51. Pp. 935-942.
27. Experimental characterization and numerical modeling of micromechanical damage under different stress states / Achouri M., Germain G., Dal Santo Ph., Saidane D. // *Materials & Design*. 2013. Vol. 50. Pp. 207-222.
28. Barsoum I., Faleskog J., Pingle S. The Influence of the Lode Parameter on Ductile Failure Strain in Steel // *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 10. Pp. 69-75.

Regressive analysis of steel polygonal poles' stress-strain state

I. M. Garanzha ²,

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, 2 Derzhavina st., Makeyevka, Donetsk region, 86123, Ukraine.

ARTICLE INFO

Article history

Received 14 May 2013
Received in revised form 30 November 2013
Accepted 30 November 2013

Keywords

steel polygonal poles;
stress-strain state;
regressive analysis;
influence factors;
coefficients of factors importance;
planning matrix;
reproducibility variance.

ABSTRACT

Influence level of basic structural dates variability separately standing steel polygonal poles to their stress-strain state that gives chance realizations of careful entering and current control of material at structural manufacturing is established in this paper. As the necessary parameters are accepted the pole's wall thickness $t_p \pm \Delta t$, the bottom pole's diameter $d_b \pm \Delta d$ and telescopic junction overlap of the pole's sections $hN_p \pm \Delta h$. Regression equations for stress-strain state steel pole with ten facets are obtained.

Recommendations for manufacturers which consist in obligatory performance entering control of minus tolerance steel sheet thickness are offered ($-\Delta t = 5\%$ from nominal t) irrespective of geometrical poles parameters and current control of their bottom diameters ($-\Delta d = 5 \dots 10$ mm) at manufacturing stage).

²

Corresponding author:
+38 (095) 479 4672, garigo@mail.ru (Igor Michailovich Garanzha, Ph. D., Associate Professor)