

finding the best design parameters that satisfy technological limitations and strength limitations, thus providing a minimum of the objective function. Today topological optimization methods are relatively new component of design procedure but are increasingly used, for example, in the aerospace industry.

Using topological optimization method and appropriate software it is possible to work with existing construction of the traverse.

Keywords: *casting crane, traverse, metal construction, spatial model, design scheme, finite element method, synthesis, topological optimization method, thermal loads.*

Сагиров Ю. Г., Суглобов В. В.

ПРИМЕНЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДВЕСКИ ЛИТЕЙНОГО КРАНА

Целью этой работы является моделирование, анализ фактического напряженно-деформированного состояния элементов траверсы литейного крана с учетом массы поднимаемого груза, теплового воздействия и дополнительных инерционных нагрузок, и получения новой конструкции элементов траверсы с применением топологической оптимизации. Объектом исследования является закономерность распределения напряжений в элементах траверсы. В статье предложена методология моделирования и анализа напряженно-деформированного состояния траверсы литейного крана с учетом дополнительных нагрузок, основанная на методах расчетов на прочность по допускаемым напряжениям и методе конечных элементов. Разработана расчетная схема, твердодеформированная модель и выполнен расчет методом конечных элементов в CAD/CAE системе.

В статье приведены результаты моделирования нагруженного состояния с учетом дополнительных нагрузок и расчета траверсы литейного крана на прочность методом конечных элементов в CAD/CAE системе; анализ напряженно-деформированного состояния траверсы, основанный на методах расчетов на прочность по допускаемым напряжениям и методе конечных элементов. С использованием топологической оптимизации получена новая конструкция элементов траверсы. Определены возможные пути дальнейших исследований.

Ключевые слова: *литейный кран, металлоконструкция, пространственная модель, расчетная схема, метод конечных элементов, синтез, топологическая оптимизация, тепловые нагрузки.*

Рекомендовано до публикації: д-р техн. наук, проф. Іщенко А. О.
Стаття надійшла 5.11.2019 р.

УДК 621.791.672.052

doi.org/10.31498/2522-9990212019187534

Серенко А. Н., Серенко В. А., Варванский Д. К.

ОПТИМИЗАЦИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Развитие методов проектирования сварных соединений и конструкций чаще всего связывают с поиском оптимальной геометрической формы и размеров конструкции с целью достижения минимальной массы, трудоемкости изготовления и других показателей.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Оптимизационное проектирование сварных конструкций связано с необходимостью учета многочисленных условий и параметров конструктивного, технологического, эксплуатационного, стоимостного и др. факторов, включающие в себя противоречивые требования, согласовать которые между собой весьма сложно. Поэтому целесообразно разбить общую задачу оптимизации на простейшие подзадачи, решение которых может быть проанализировано проектировщиком с учетом обеспечения условия равнопрочности всех узлов конструкции, включая и сварные соединения. Наиболее простым критерием оптимизации сварного соединения является минимум его стоимости, включающего стоимость сварного шва и основного металла, соединяемого данным швом.

Рассмотрен пример определения оптимальных конструктивно-технологических параметров сварных швов в зоне сопряжения трубчатой колонны поворотного крана с базовой плитой с помощью угловых швов по торцу трубы и в местах сопряжения усиливающих ребер с колонной и плитой. На колонну действует продольная сила сжатия с изменяющимся эксцентриситетом, а её сечение подобрано с учетом прочности, устойчивости и жесткости. Упрощенная задача оптимизации сформулирована таким образом: минимизировать целевую функцию стоимости соединения при условии обеспечения равнопрочности соединения и колонны.

Показано, что условие равнопрочности может выполняться при различных вариантах соотношения конструктивных размеров основания колонны и размеров шва, что приводит к изменению стоимости соединения.

При изменении катета шва изменяются и размеры силовых ребер. Поэтому имеется возможность выбора конструктивно-технологических параметров соединения в достаточно широком диапазоне их изменения.

Следует отметить, что при усложнении структуры и полноты используемого критерия оптимальности проектируемой конструкции, удовлетворяющей многообразным требованиям нормативных документов, значительно увеличивает область возможных решений. Поэтому, выбор метода поиска экстремума целевой функции остается за проектантом.

Ключевые слова: *оптимальное проектирование сварных соединений, равнопрочность, стоимость соединения, внецентренное нагружение колонны, условия прочности угловых швов.*

Постановка проблемы. При создании конкурентоспособных сварных конструкций следует стремиться к обеспечению высокого уровня их качества (надежности) и полного соответствия эксплуатационному назначению при минимальной стоимости. Применяемые в настоящее время методы проектирования и расчета сварных конструкций основаны, как правило, на использовании нормативных документов (СНиП и др.). Развитие методов проектирования чаще всего связывают с поиском оптимальной геометрической формы и размеров конструкции с целью достижения минимальной массы, трудоемкости изготовления и других показателей [1-4, 7]. Следует, однако, отметить, что разработанные принципы оптимального проектирования сварных конструкций недостаточно полно учитывают особенности образования сварных соединений, влияющие на характеристики местной прочности, структурные изменения металла, образование остаточной напряженности и др. факторы [5].

Цель статьи – разработка инженерной методики оптимизации сварных соединений, обеспечивающей минимальную стоимость и равнопрочность сварных швов с несущим элементом конструкции.

Изложение основного материала. Оптимизационное проектирование сварных конструкций связано с необходимостью учета многочисленных условий и параметров

конструктивного, технологического, эксплуатационного, стоимостного и др. факторов, включающие в себя противоречивые требования, согласовать которые между собой весьма сложно. Поэтому целесообразно разбить общую задачу оптимизации на простейшие подзадачи, решение которых может быть проанализировано проектировщиком с учетом обеспечения условия равнопрочности всех узлов конструкции, включая и сварные соединения.

По-видимому, наиболее простым критерием оптимизации сварного соединения является минимум его стоимости, включающей стоимость сварного шва и основного металла, соединяемого данным швом при обеспечении равнопрочности всех несущих элементов конструкции.

Рассмотрим, например, соединение трубчатой колонны поворотного крана с базовой плитой (рис.1) с помощью угловых швов по торцу трубы и в местах сопряжения усиливающих ребер с колонной и плитой.

На колонну действует продольная сила сжатия с изменяющимся эксцентриситетом e , а её сечение подобрано с учетом прочности, устойчивости и жесткости. Здесь рассмотрим лишь методику определения оптимальных конструктивно-технологических параметров сварных швов в зоне сопряжения колонны с ребрами и основанием.

Упрощенную задачу оптимизации можно сформулировать таким образом: минимизировать целевую функцию стоимости соединения:

$$C_c = C_{ii} + C_{ci} \rightarrow C_{\min}, \quad (1)$$

где C_{ii} , C_{ci} - стоимость основного и наплавленного металла, грн.

Определение функции минимальной стоимости сварного соединения производится при условии обеспечения равнопрочности колонны и сварного соединения. Так, при действии на колонну внецентренной силы P , условие равнопрочности можно записать в таком виде:

$$P_{ii} = P_{ci}, \quad (2)$$

где P_{ii} , P_{ci} - предельно-допустимые силы на трубчатый элемент и на сварное соединение соответственно, Н.

Внецентренное нагружение колонны приведет к появлению в рассчитываемом сечении вблизи ребер двух силовых факторов: сжимающей силы P и изгибающего момента $M = P \cdot e$.

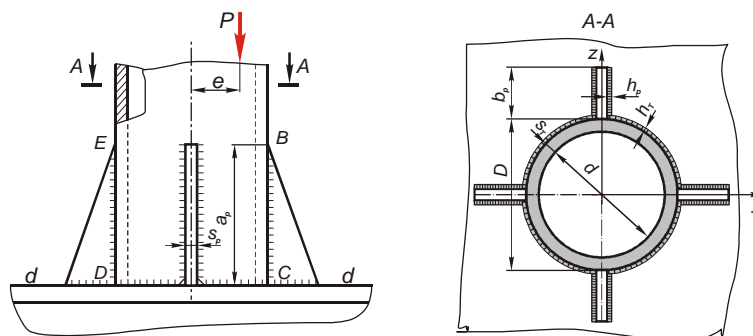


Рисунок 1 – Соединение стойки крана с базовой плитой

Тогда, условие статической прочности трубы (*ом*) может быть представлено в таком виде:

$$\sigma = \frac{P_{ii}}{F_{ii}} + \frac{P_{ii} \cdot e}{W_{ii}} \leq [\sigma], \quad (3)$$

где $F_{ii} = \frac{\pi D^2}{4}(1 - \alpha^2)$ - площадь поперечного сечения колонны, м²;

$W_{ii} = \frac{\pi D^3}{32}(1 - \alpha^4)$ - момент сопротивления поперечного сечения колонны, м³;

$\alpha = d/D$ - соотношение диаметров трубы;

$[\sigma]$ - допускаемые напряжения для металла трубы, МПа.

Из условия (3) найдем предельно-допустимую силу на трубу:

$$P_{ii} = \frac{[\sigma]}{1/F_{ii} + e/W_{ii}}. \quad (4)$$

Прочность сварного соединения с ребрами, дополнительно повышающими жесткость и несущую способность основания колонны, необходимо проверять в двух вероятных сечениях разрушения сварных швов: в ломаном сечении *BCDE* и в плоскости *OO* (см. рис. 1). В связи с этим возникает некоторая неопределенность для последующего составления целевой функции стоимости соединения (1). Практическим вариантом решения рассматриваемой задачи может быть такой: вначале рассматриваем условие прочности в ломаном сечении *BCDE*, с определением параметров сварного шва и продольного размера ребер a_p , обеспечивающих минимум стоимости при заданном соотношении размеров $\eta = a_p/b_p$, затем делаем проверку прочности во втором сечении *OO*. Если условие прочности в этом сечении не выполняется, то делается последующее уточнение всех параметров соединения до получения приемлемого результата.

Прочность сварных швов в ломаном сечении *BCDE* определяется при действии двух силовых факторов: сжимающей силы P_{cc} и изгибающего момента $M_{cc} = P_{cc} \cdot e$. Сжимающую силу воспринимают продольные швы всех четырех ребер и кольцевой шов по торцу трубы, а изгибающий момент – продольные швы двух ребер, лежащих в плоскости изгиба и кольцевой шов трубы. Для нахождения напряжений от изгибающего момента можно воспользоваться способом расчленения соединения на составляющие [6]. Принимаем, что момент M_{cc} уравнивается моментом пары сил, образующихся в продольных швах двух ребер длиной a_p (*BC* и *DE*) и моментом, воспринимаемым кольцевым швом трубы.

Тогда, общее условие прочности угловых швов в рассматриваемом сечении будет иметь вид:

$$\tau = \frac{P_{cc}}{F_{cc}} + \frac{P_{cc} \cdot e}{W_{e\phi} + 2h_p a_p \left(D + \frac{2}{3}k \right)} \leq [\tau'], \quad (5)$$

где F_{cc} - площадь расчетного сечения всех швов, воспринимающих силу P_{cc} , м²;

Машинобудування і зварювальне виробництво

$W_{\epsilon\phi}$ - момент сопротивления кольцевого сечения шва, м³;

$h_p = \beta k$ - расчетная толщина сечения углового шва;

β - коэффициент глубины проплавления углового шва;

$[\tau']$ - допускаемые напряжения среза для металла шва, МПа.

Геометрические характеристики сечений швов, используемые в условии (5) определяются по формулам:

$$F_{cc} = \frac{\pi(D + 2h_p)^2}{4}(1 - \alpha_1^2) + 8h_p a_p; \quad \alpha_1 = \frac{D}{D + 2h_p}; \quad W_{\epsilon\phi} = \frac{\pi(D + 2h_p)^3}{32}(1 - \alpha_1^4).$$

Из формулы (5) найдем предельно-допустимую силу на швы в ломаном сечении: **BCDE**

$$P_{cc} = \frac{[\tau']}{\frac{1}{F_{cc}} + \frac{e}{W_{\epsilon\phi} + 2h_p a_p \left(D + \frac{2}{3}k \right)}}. \quad (6)$$

Допускаемые напряжения для швов задаются в долях от допускаемых напряжений для основного металла $[\tau'] = \zeta [\sigma]$. Условие равнопрочности (2) в развернутом виде (для случая равных катетов шва k в соединении) можно представить в таком виде:

$$\frac{1}{\frac{1}{F_{ii}} + \frac{e}{W_{ii}}} - \frac{\zeta}{\frac{1}{F_{cc}} + \frac{e}{W_{\epsilon\phi} + 2h_p a_p \left(D + \frac{2}{3}k \right)}} = 0 \quad (7)$$

Из (7) следует, что условие равнопрочности может выполняться при различных вариантах соотношения конструктивных размеров основания колонны и размеров шва, что приводит к изменению стоимости соединения, определяемого по формуле (1).

С учетом изложенного стоимость соединения можно представить в таком виде:

$$C_c = V_{ii} \gamma C_{ii} + V_{ii} \gamma C_{ii} = (F_{ii} a_p + a_p b_p s_p) \gamma C_{ii} + 0,5k^2 l_{\Sigma} \gamma C_{ii}, \quad (8)$$

где V_{ii} ; V_{ii} - объем основного металла (трубы на длине a_p и четырех ребер) и наплавленного металла соответственно, м³;

γ - плотность металла, кг/м³;

$l_{\Sigma} = \pi(D + \beta k) + 8(a_p + b_p)$ - суммарная длина угловых швов в ломаном сечении

BCDE, м.

Поиск глобального экстремума многопараметрической функции (8) при заданных ограничениях, можно осуществить с помощью известных программ (например, программа Variant [7]) или использования математического редактора MathCAD. Однако, получаемые при этом расчетные значения конструктивно-технологических параметров соединения, могут

не отвечать приемлемым значениям, например, расчетный катет шва получается слишком большим. Поэтому целесообразнее искать минимум функции (8) в диалоговом режиме, руководствуясь сложившейся расчетной практикой и нормативными требованиями.

Рассмотрим пример расчета соединения с такими исходными данными: колонна и рёбра выполнены из стали марки Ст3; сварка – полуавтоматическая в среде углекислого газа; $D = 0,325$ м; $d = 0,307$ м; $\gamma = 7800$ кг/м³; $C_{ом} = 40$ грн/кг; $C_{нм} = 30 C_{ом}$; $\beta = 0,8$; $\eta = 1,5$; $\xi = e/D$; $\zeta = [\tau']/[\sigma] = 0,65$.

Расчет выполняется в такой последовательности: задаем в матричной форме размеры катетов швов в желаемом диапазоне (например, от 0,003 до 0,015 м); по условию (7) рассчитываем соответствующие значения длины продольного шва (a_p) при заданной величине эксцентриситета e ; по формуле (8) рассчитываем стоимость соединения и результаты представляем также в матричной форме.

Используя программу интерполяции сплайном, строим графические зависимости стоимости соединения от величины катета шва (рис. 2).

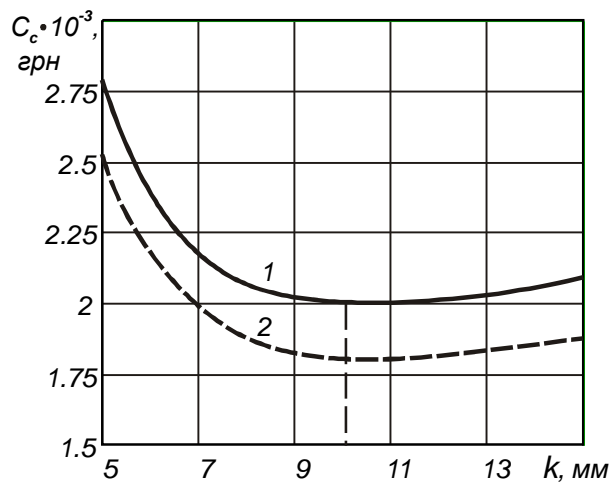


Рисунок 2 – Зависимость стоимости сварного соединения основания колонны от величины катета шва: 1 – относительный эксцентриситет $\xi = 0$; 2 – $\xi = 10$

Как видно из рисунка стоимость соединения имеет минимум при величине катете шва 10 мм как для центрального, так и внецентренного действия сжимающей силы. Можно также отметить, что стоимость соединения практически близка к минимальной при изменении катета от 8 до 13 мм. При изменении катета шва изменяются и размеры силовых ребер. Поэтому имеется возможность выбора конструктивно-технологических параметров соединения в достаточно широком диапазоне.

После выбора конструктивного варианта соединения необходимо выполнить проверку прочности швов в плоском сечении OO (см. рис. 1). При составлении условия прочности в их рабочую площадь следует включить кольцевой шов по торцу трубы и участки горизонтальных швов длиной b_p .

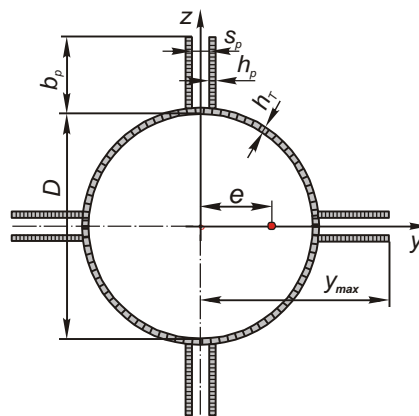


Рисунок 3 – Вид рабочего сечения швов в плоскости OO

Тогда, общее условие прочности угловых швов в рассматриваемом сечении будет иметь вид:

$$\tau = \frac{P_{ccd}}{F_{ccd}} + \frac{P_{ccd} \cdot e}{J_{ccd} / y_{max}} \leq [\tau'] \quad (9)$$

где F_{ccd} - расчетная суммарная площадь среза всех швов, лежащих в плоскости dd , m^2 ;

J_{ccd} - момент инерции бисекториального сечения среза всех швов, m^4 .

Геометрические характеристики сечений швов, используемые в условии (9) определяются по формулам:

$$F_{ccd} = \frac{\pi(D + 2h_p)^2}{4} (1 - \alpha_1^2) + 8h_p b_p; \quad W_{ccd} = \frac{J_{ccd}}{y_{max}};$$

$$J_{ccd} = \frac{\pi(D + 2h_p)^4}{64} (1 - \alpha_1^4) + 4h_p b_p \left[0.5(D + b_p) \right]^2 + \frac{h_p b_p^3}{3}.$$

Если расчетные напряжения (9) будут превышать допустимые больше чем на 5 %, то поперечный размер ребра необходимо увеличить.

Рассматривая различные конструктивно-технологические варианты проектируемого соединения, можно в определенных пределах регулировать как затраты, так и уровень надежности. Более общим подходом к расчету элементов сварных конструкций будет такой, при котором по заданной (нормативной) надежности [7] определяют искомые параметры, в частности, размеры поперечного сечения элементов, при одновременном решении оптимизационной задачи.

ВЫВОДЫ

1. Предложена упрощенная методика оптимизации сварных соединений, позволяющая выполнять вариантное проектирование элементов сварных конструкций, отвечающих требованиям прочности и экономичности.

2. На примере расчета сварного соединения трубчатой колонны поворотного крана с базовой плитой показано, что предложенная методика дает возможность выбора

Машинобудування і зварювальне виробництво

конструктивно-технологических параметров соединения в достаточно широком диапазоне при незначительном отклонении стоимости от минимума.

Список использованных источников:

1. Лихтарников, Я. М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций / Я. М. Лихтарников. – М.: Стройиздат, 1979. – 316 с.
2. Тарарушкин, Ю. Ф. Оптимизация несущих конструкций: учеб. пособие / Ю. Ф. Тарарушкин. – М.: МГУПС (МИИТ), 2015. – 120 с.
3. Козиков, А. М. Современные тенденции в вопросе оптимизации металлических конструкций / А. М. Козиков, Т. С. Гуж, В. А. Ильичев // Молодежный научный форум: технические и математические науки. – М., 2017. – № 2. – С. 51–57.
4. Котлышев, Р. Р. Оптимизация себестоимости сварных нахлесточных соединений, нагруженных продольной силой / Р. Р. Котлышев // Вестник ДГТУ. – 2007. – № 1. – С. 70–77.
5. Окерблом, Н. О. Конструктивно-технологическое проектирование сварных конструкций / Н. О. Окерблом. – М.: Машиностроение, 1964, – 418 с.
6. Серенко, А. Н. Расчет сварных соединений и конструкций. Примеры и задачи: учеб. пособие / А. Н. Серенко, М. Н. Крумбольдт, К. В. Багрянский. – К.: Вища школа, 1977. – 337 с.
7. Серенко, А. Н. Принципы оптимизации и расчета элементов сварных конструкций заданной надежности / А. Н. Серенко // Автоматическая сварка. – 1996. – № 8. – С. 13–16.

Серенко О. М., Серенко В. О., Варванський Д. К.

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розвиток методів проектування зварних з'єднань і конструкцій найчастіше зв'язують з пошуком оптимальної геометричної форми і розмірів конструкції з метою досягнення мінімальної маси, трудомісткості виготовлення і інших показників.

Оптимізаційне проектування зварних конструкцій пов'язане з необхідністю обліку численних умов і параметрів конструктивного, технологічного, експлуатаційного, вартісного та ін. чинників, суперечливі вимоги, що включають, погоджувати які між собою дуже складно. Тому доцільно розбити загальне завдання оптимізації на прості підзадачі, рішення яких може бути проаналізоване проектувальником з урахуванням забезпечення умови рівномірності усіх вузлів конструкції, включаючи і зварні з'єднання. Найбільш простим критерієм оптимізації зварного з'єднання є мінімум його вартості, зварного шва, що включає вартість, і основного металу, що сполучається цим швом.

Розглянутий приклад визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів зварних швів в зоні сполучення трубчастой колони поворотного крана з базовою плитою за допомогою кутових швів по торцю труби і в місцях сполучення посилюючих ребер з колоною і плитою. На колону діє подовжня сила стискування з ексцентриситетом, що змінюється, а її переріз підібраний з урахуванням міцності, стійкості і жорсткості. Спроцжене завдання оптимізації сформульоване таким чином: мінімізувати цільову функцію вартості з'єднання за умови забезпечення рівномірності з'єднання і колони.

Показано, що умова рівномірності може виконуватися при різних варіантах співвідношення конструктивних розмірів основи колони і розмірів шва, що призводить до зміни вартості з'єднання.

Машинобудування і зварювальне виробництво

При зміні катета шва змінюються і розміри силових ребер. Тому є можливість вибору конструктивно-технологічних параметрів з'єднання в досить широкому діапазоні їх зміни.

Слід зазначити, що при ускладненні структури і повноти використовуваного критерію оптимальності спроектованої конструкції, що задовольняє різноманітним вимогам нормативних документів, значно збільшує область можливих рішень. Тому, вибір методу пошуку екстремуму цільової функції залишається за проектантом.

Ключові слова: оптимальне проектування зварних з'єднань, рівномірність, вартість з'єднання, позацентрове навантаження колони, умови міцності кутових швів.

Serenko A. N., Serenko V. A., Varvanskiy D. K.

OPTIMIZATION OF THE WELDING JOINTS OF METALLIC CONSTRUCTIONS

The development of methods for the design of welded joints and structures is most often associated with the search for the optimal geometric shape and size of the structure in order to achieve minimum mass, labor-intensive production and other indicators.

Optimization design of welded structures is associated with the need to take into account numerous conditions and parameters of constructive, technological, operational, cost, and other factors, including conflicting requirements, which are very difficult to reconcile with each other. Therefore, it is advisable to divide the general optimization problem into the simplest subtasks, the solution of which can be analyzed by the designer with due regard for ensuring the condition of equal strength of all components of the structure, including welded joints. The simplest criterion for optimizing a welded joint is the minimum of its cost, which includes the cost of the weld and the base metal connected by this weld.

An example of determining the optimal structural and technological parameters of welds in the junction zone of a tubular column of a rotary crane with a base plate with the help of fillet welds at the pipe end and at the junction points of the reinforcing ribs with the column and plate is considered. A longitudinal compression force with varying eccentricity acts on the column, and its cross-section is selected taking into account strength, stability and rigidity. A simplified optimization problem is formulated in the following way: to minimize the objective function of the cost of the connection provided that the connection and the column are of equal strength.

It is shown that the condition of equal strength can be performed for different variants of the ratio of the structural dimensions of the base of the column and the dimensions of the seam, which leads to a change in the cost of the connection.

When you change the leg of the seam and change the size of the power ribs. Therefore, there is a possibility to choose constructive-technological parameters of a compound in a rather wide range of their change.

It should be noted that with the complexity of the structure and completeness of the optimality criterion of the design being designed, satisfying the diverse requirements of regulatory documents, significantly increases the range of possible solutions. Therefore, the choice of the method for finding the extremum of the objective function remains with the designer.

Keywords: *optimal design of welding joints, uniform strength, cost of joining, non-central loading of a column, strength conditions for corner joints.*

Рекомендована к публикации: д-р техн. наук, проф. Матвиенко В. Н.

Статья поступила 27.06.2019 г.