

А. А. Ворожбит

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, Российская Федерация

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В МОСТОСТРОЕНИИ

Аннотация

Основным методом соединения металлических элементов в мостостроении является сварка. Этот процесс является очень трудоемким и требует высокой точности, а также влечёт за собой образование усталостных трещин, которые негативно влияют на дальнейшую работу конструкции. Данную проблему можно решить с помощью пайки. Основное отличие пайки от сварки в том, что при паяном соединении металл не плавится и его структурные связи не нарушаются. Этот способ соединения может применяться в различных случаях: усиление стенок главной балки постановкой металлических накладок с помощью пайки и локализация усталостных трещин индукционным прогревом устья с последующей проковкой, соединение арматурных плетей в один стержень и соединение труб в натяг.

В пешеходных мостах из трубчатых элементов, где трубы могут соединяться в натяг, пайка может служить значительным усилением соединения для повышения несущей способности и долговечности конструкции. Паяльная паста может заполнить зазоры между соединяемыми трубами, исключить пустоты между элементами и повысить несущую способность соединения (кН). Также данную технологию с пайкой можно применить при соединении арматуры главных балок в одну плеть, используя разные способы соединения.

В статье приведены результаты исследования пайки как способа соединения металлических элементов в мостостроении в виде экспериментов, эмпирических расчетов и расчетов в специализированных программных комплексах. На основе результатов данного исследования можно будет судить о возможностях и перспективах применения паяных соединений в мостостроении.

Ключевые слова: паяное соединение, трубчатые элементы, натяг, пайка, металлические соединения, пролетное строение, несущая способность.

A. A. Vorozhbit

Siberian Transport University, Novosibirsk, the Russian Federation

PROSPECTS FOR THE USE OF SOLDERED JOINTS IN BRIDGE CONSTRUCTION

Abstract

The main method of joining metal elements in bridge construction is welding. This process is very labor-intensive and requires high accuracy, and also entails the formation of fatigue cracks, which negatively affect the further work of the structure. This problem can be solved by soldering. The main difference between soldering and welding is that when the metal is soldered, it does not melt and its structural bonds are not broken. This method of connection can be used in various cases: reinforcement of the walls of the main beam by setting metal linings with soldering and localization of fatigue cracks by induction heating of the mouth with subsequent forging, connection of reinforcing lashes into one rod and connection of pipes in tension.

In pedestrian bridges made of tubular elements, where pipes can be connected in tension, soldering can serve as a significant reinforcement of the connection to increase the load-bearing capacity and durability of the structure. Soldering paste can fill the gaps between the pipes to be connected, eliminate gaps between the elements and increase the bearing capacity of the joint (kN). Also, this technology with soldering can be applied when connecting the fittings of the main beams into one lash, using different connection methods.

The article presents the results of the study of soldering as a method of connecting metal elements in bridge construction in the form of experiments, empirical calculations and calculations in specialized software complexes. Based on the results of this study, it will be possible to judge the possibilities and prospects of using soldered joints in bridge construction.

Keywords: soldered connection, tubular elements, tension, soldering, metal connections, superstructure, load-bearing capacity.

Введение

Целью данной работы является рассмотрение возможности применения паяных соединений в узлах конструкций пешеходных мостов из трубчатых элементов. Для достижения

поставленных целей нужно было решить следующие задачи: провести теоретический расчет несущей способности соединений, выполнить конечно-элементную модель в программном комплексе Ansys и провести эксперимент на сжатие образцов.

За последнее десятилетие сформировались тенденции к проектированию пешеходных мостов из трубчатых элементов преимущественно круглого сечения [1].

Для объединения трубчатых элементов в конструкцию используется сварка [2]. Для такого типа соединения это очень высокоточный процесс, так как длина катета сварочного шва ограничена толщиной трубы и будет составлять всего несколько миллиметров, то неточность в процессе сварки может привести к большой потере прочности соединения [3]. Поэтому целесообразно внедрить новый тип соединения, который будет гораздо практичнее и прочнее сварки.

В машиностроении широкое применение получило соединение с натягом – неподвижное соединение деталей, у которых перед сборкой наружный размер охватываемой детали (d_b) больше соответствующего внутреннего размера охватывающей детали (d_0) (рис.1) [4].

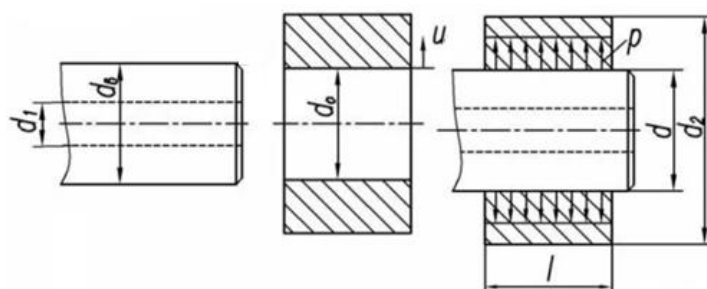


Рис. 1. Схема соединения деталей натягом

Для соединения данных деталей необходимо увеличить размер d_0 с помощью индукционного нагрева. Упругие свойства соединяемых деталей вызывают силы сопротивления растяжению-сжатию материалов, которые, преодолевая трение и неровности контактирующих поверхностей, создают гарантированный натяг, обеспечивая прочность соединения [5].

В машиностроении несущую способность цилиндрических соединений с натягом в осевом направлении рассчитывают по формуле (1), [6]:

$$F = \pi \cdot d_b \cdot l \cdot p \cdot \mu \quad (1)$$

где d_b – внешний диаметр охватываемой детали, м;

l – длина сопряжения труб, м;

p – среднее давление в соединении, МПа;

μ – коэффициент трения стали, равный 0,18;

Для определения среднего давления в расчётах соединения деталей на прочность в машиностроении используют зависимости Ляме (2), [7]:

$$p = \frac{E\delta}{d_e \cdot (C_1 + C_2)}, \quad (2)$$

где δ – натяг в соединении, м;

E – модуль упругости стали, Па;

d_b – внешний диаметр охватываемой детали, м;

C_1, C_2 – расчётные коэффициенты, определяемые по формулам (3) и (4), [8]:

$$C_1 = \frac{1 + (d_1/d_e)^2}{1 - (d_1/d_e)^2} - \mu_1; \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{1 + (d_e/d_2)^2}{1 - (d_e/d_2)^2} - \mu_2; \quad (4)$$

где d_1 – внутренний диаметр охватываемой детали, м;

d_2 – внешний диаметр охватывающей детали, м;

μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона для стали, равный 0,3;

Для расчета и эксперимента на станке были выточены два образца труб: с внутренним диаметром (d_0) 44,50 мм и с внешним диаметром ($d_в$) 44,55 мм. Толщина труб составляет 7 мм, поэтому они подходят для соединения в натяг, который был принят длиной 20 мм. Для данных образцов теоретически были определены давление в соединении, разрывающая сила и возникающие напряжения:

$$C_1 = \frac{1 + (0,03755/0,04455)^2}{1 - (0,03755/0,04455)^2} - 0,3 = 5,61;$$

$$C_2 = \frac{1 + (0,04455/0,05150)^2}{1 - (0,04455/0,05150)^2} - 0,3 = 6,65;$$

$$p = \frac{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,05 \cdot 10^{-3}}{0,04455 \cdot (5,61 + 6,65)} = 19,22 \text{ МПа};$$

$$F = 3,14 \cdot 0,04455 \cdot 0,02 \cdot 19,22 \cdot 0,19 = 10,22 \text{ кН}$$

По формуле (5) вычислим наибольшие окружные напряжения сжатия в охватываемой детали [9]:

$$\sigma_\ell = p \cdot \frac{2 \cdot (d_1 / d_e)^2}{1 - (d_1 / d_e)^2}; \quad (5)$$

По формуле (6) вычислим наибольшие окружные напряжения растяжения в охватывающей детали:

$$\sigma_t = p \cdot \frac{1 + (d_0 / d_2)^2}{1 - (d_0 / d_2)^2}; \quad (6)$$

$$\sigma_\ell = 19,22 \cdot \frac{2 \cdot (0,03755/0,04455)^2}{1 - (0,03755/0,04455)^2} = 94,3 \text{ МПа};$$

$$\sigma_t = 19,22 \cdot \frac{1 + (0,04450/0,05150)^2}{1 - (0,04450/0,05150)^2} = 133,3 \text{ МПа};$$

Полученные результаты расчета были сравнены с расчетом в программном комплексе Ansys. Составлена конечно-элементная модель, получены окружные напряжения растяжения в охватывающей детали и сжатия в охватываемой детали [10]. Модель выполнена с помощью объёмных конечных элементов, поскольку для корректной оценки напряженно-деформированного состояния необходима информация о компонентах напряжений и деформаций по всем направлениям. Для решения контактных задач применяется нелинейный расчёт, поскольку он позволяет учитывать фактическую жёсткость в области контакта при каждом шаге нагружения [11]. Полученные окружные напряжения растяжения в охватывающей детали и окружные напряжения сжатия в охватываемой детали неравномерно распределены по длине сопряжения деталей, а также резко увеличиваются по концам соединяемых деталей (понятие среднее давление p искажает результат), поэтому при расчете напряжений по формулам (5) и (6) получены погрешности, но значения сопоставимы с расчетом в Ansys (рис.2).

Для проведения эксперимента требовалось подготовить образцы, проточив их на станке для обеспечения разницы диаметров в 0,05 мм. Такой выбор обеспечит растяжение охватывающей трубы в диаметре при нагреве более чем на 0,05 мм для натяга [12]. Сборка деталей осуществлялась с помощью индукционного нагрева [13]. Эксперимент на сжимающей машине обусловлен тем, что в мостовых конструкциях из трубчатых элементов имеются узлы, работающие только на сжатие.

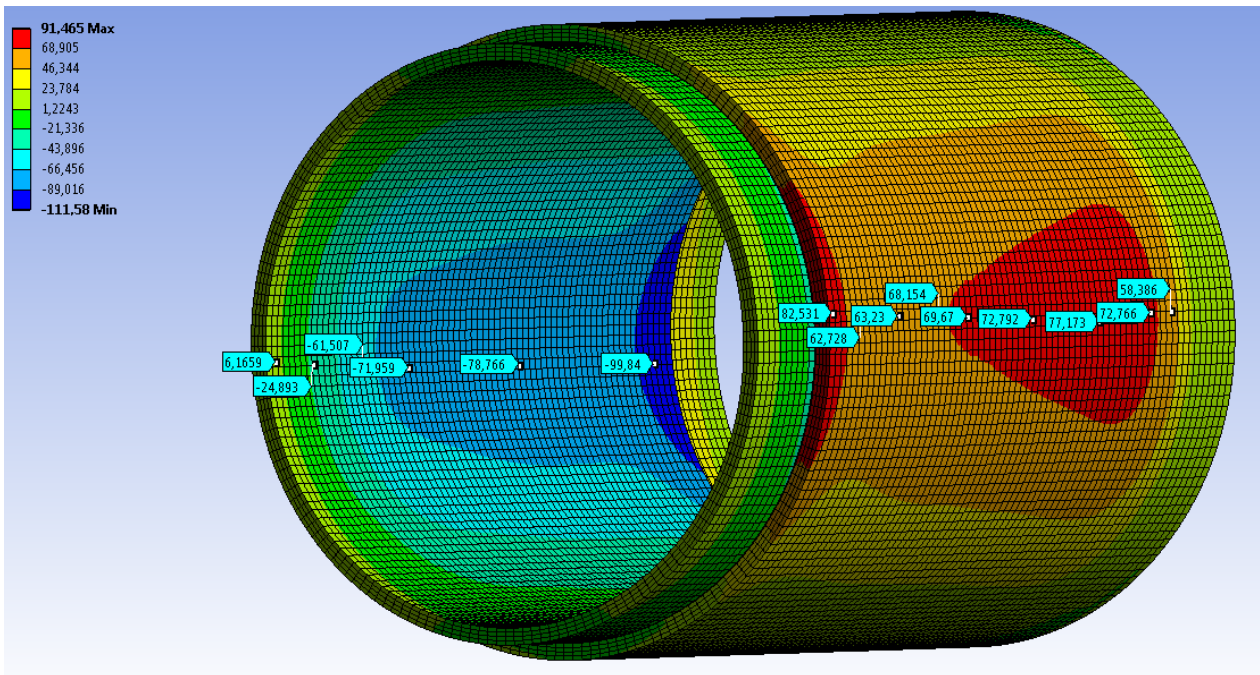


Рис. 2. Расчет в программном комплексе Ansys

Заготовка была поставлена под пресс для определения предела прочности на сжатие. В результате был получен график нагружения, на котором видно, что после нагрузки в 8 кН началось перемещение и верхний образец начал вдавливаясь в нижний (рис. 3). По расчетам соединение должно было выдержать нагрузку в 10,22 кН.

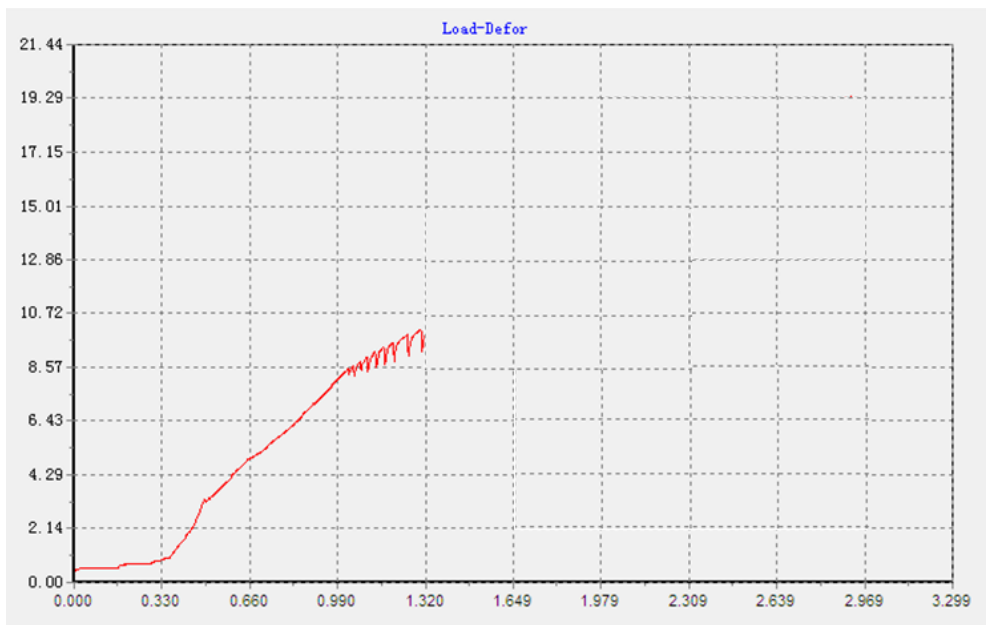


Рис. 3. График нагружения первого образца на сжатие

Следующим этапом работы был эксперимент на сжатие с использованием пайки. Стальные трубы были выточены с зазором в 0,05 мм, который был заполнен паяльной пастой Pate 1800PA и разогреты с помощью индукционного нагрева на длину 20 мм [14]. Для таких типов соединения не существует расчетной формулы, поэтому несущую способность можно будет рассчитывать только после проведения многократных экспериментов с образцами различных диаметров, длин сопряжения и натягов и вывода эмпирической формулы. Образец был поставлен в машину для сжатия. После нагрузки в 103 кН место пайки дало трещину.

Анализ полученных данных показал, что несущая способность увеличилась более чем в 10 раз благодаря пайке (рис 4).

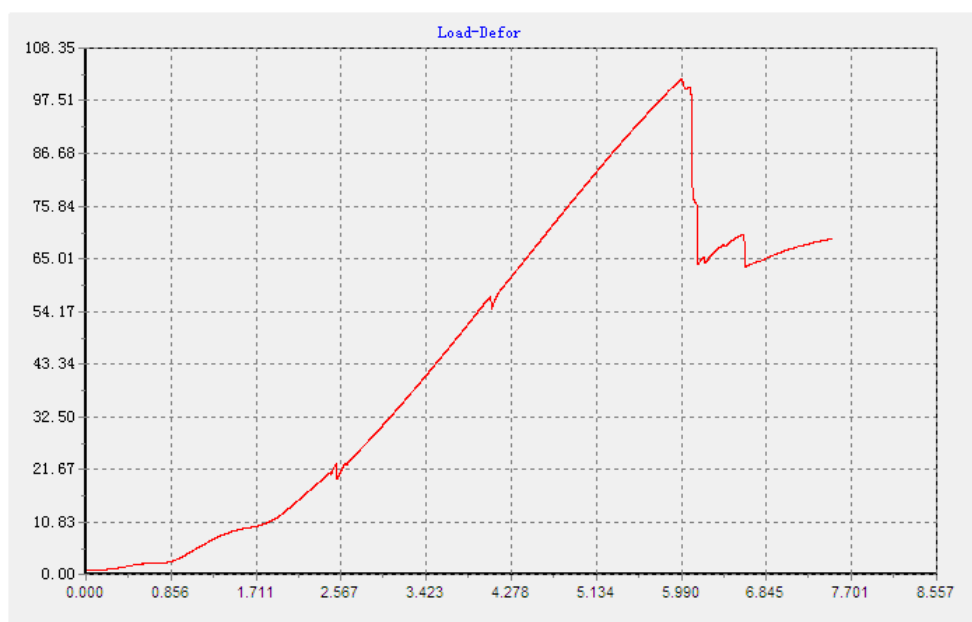


Рис. 4. График нагружения второго образца на сжатие

Данный эксперимент сопровождался снятием на тепловизор, чтобы более наглядно увидеть поведение соединений при нагрузке [15]. В момент разрыва место пайки нагрелось чуть более чем на 1 градус, что доказывает резкое увеличение напряжений при разрыве. Данная методика может применяться для контроля предельного состояния конструкции в ходе эксперимента.

Заключение

Таким образом, методика соединения трубчатых деталей в машиностроении является перспективной и для мостостроения, а с помощью пайки можно увеличить несущую способность этого соединения в разы. Для более детального изучения свойств пайки требуется большое количество экспериментов, которые позволят вывести эмпирические формулы для расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Овчинников И.И., Караханян А.Б., Овчинников И.Г., Скачков Ю.П. Современные пешеходные и велосипедные мосты (основные концепции проектирования и примеры). Пенза: ПГУАС, 2018. 140 с.
2. Саламахин П.М. Проектирование мостовых и строительных конструкций. М.: Изд-во КноРус, 2011. 416 с.
3. Кулик Т.А. Словарь-справочник по сварке. Киев: Наукова думка, 1974. 195 с.
4. Схиртладзе А.Г. Технологические процессы в машиностроении. М.: Высшая школа, 2007. 928 с.
5. Блинов Д.С., Алешин В.Ф. Соединения деталей по сопрягаемым цилиндрическим поверхностям. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 64 с.
6. Протасов А.В., Зайдес С.А. Надёжность крупногабаритных соединений с гарантированным натягом. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 152 с.
7. Гречищев Е.С., Ильяшенко А.А. Соединения с натягом: расчёты, проектирование изготовление. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
8. Горшков А.Г., Трошин В.Н., Шалашилин В.И. Сопротивление материалов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 544 с.
9. Иванов Д.В., Доль А.В. Введение в Ansys Workbench. Саратов: Амирит, 2016. 56 с.

10. Варданын Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. М.: Инфра-М, 2011. 640 с.
11. Соловьёв Л.Ю., Цветков Д.Н., Донец А.Н. Численное моделирование пространственных объектов. Новосибирск: СГУПС, 2017. 73 с.
12. Адашкин А.М., Зуев В.М. Материаловедение (металлообработка). М.: Изд-во Академия, 2012. 288 с.
13. Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Сарапулов Ф.Н. Индукционный нагрев движущихся стальных трубных заготовок. М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 156 с.
14. Есенберлин Р.Е. Пайка металлов. М.: Машгиз, 1959. 180 с.
15. ГОСТ 16920-93. Термометры и преобразователи температуры манометрические. Общие технические требования и методы испытаний. М.: издательство стандартов, 2002. 9 с.

REFERENCES

1. Ovchinnikov I.I., Karakhanyan A.B., Ovchinnikov I.G., Skachkov Yu.P. *Sovremennye peshekhodnye i velosipednye mosty (osnovnye kontseptsii proektirovaniya i primery)* [Modern pedestrian and bicycle bridges (basic design concepts and examples)]. Penza: PGUAS Publ., 2018. 140 p.
2. Salamakhin P.M. *Proektirovanie mostovykh i stroitel'nykh konstruksij* [Design of bridge and building structures]. Moscow: KnoRus Publ., 2011. 416 p.
3. Kulik T.A. *Slovar'-spravochnik po svarke* [Dictionary-reference book on welding]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1974. 195 p.
4. Skhirtladze A.G. *Tekhnologicheskie protsessy v mashinostroenii* [Technological processes in mechanical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola, 2007. 928 p.
5. Blinov D.S., Alyoshin V.F. *Soedineniya detalej po sopryagaemym tsilindricheskim poverkhnostyam* [Connections of parts on mating cylindrical surfaces]. LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 64 p.
6. Protasov A.V., Zaides S.A. *Nadyozhnost' krupnogabaritnykh soedinenij s garantirovannym natyagom* [Reliability of large-sized joints with guaranteed tension]. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 152 p.
7. Grechishchev E.S., Ilyashenko A.A. *Soedineniya s natyagom: Raschyoty, proektirovanie izgotovlenie* [Connections with tension: Calculations, design and preparation]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981. 247 p.
8. Gorshkov A.G., Troshin V.N., Shalashilin V.I. *Soprotivlenie materialov* [Resistance of materials]. M.: FIZMATLIT Publ., 2008. 544 p.
9. Ivanov D.V., Dol' A.V. *Vvedenie v Ansys Workbench* [Introduction to Ansys Workbench]. Saratov: Amirit Publ., 2016. 56 p.
10. Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. *Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti* [The resistance of materials with the basics of the theory of elasticity and plasticity]. Moscow: Infra-M Publ., 2011. 640 p.
11. Solov'yov L.Yu., Tsvetkov D.N., Donets A.N. *Chislennoe modelirovanie prostranstvennykh ob'ektov* [Numerical modeling of spatial objects: an educational and methodical manual]. Novosibirsk: SGUPS Publ., 2017. 73 p.
12. Adashkin A.M., Zuev V.M. *Materialovedenie (metalloobrabotka)* [Materials science (metalworking)]. Moscow: Akademiya Publ., 2012. 288 p.
13. Prakh V.A., Dmitrievsky V.A., Sarapulov F.N. *Induktsionnyj nagrev dvizhushhikhsya stal'nykh trubnykh zagotovok* [Induction heating of moving steel pipe blanks]. Moscow: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 156 p.
14. Yesenberlin R.E. *Pajka metallov* [Soldering of metals]. Moscow: Mashgiz Publ., 1959. 180 p.
15. GOST 16920-93. *Termometry i preobrazovateli temperatury manometricheskie. Obshhie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy* [Thermometers and temperature converters are mano-

metric. General technical requirements and test methods]. Moscow: Izdatel'stvo standartov Publ., 2002. 9 p.

Информация об авторах

Ворожбит Андрей Алексеевич – аспирант-стажер, студент 4 курса факультета «Мосты и тоннели», Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск, e-mail: vorozhbit9229@yandex.ru

Authors

Andrey Alekseevich Vorozhbit – postgraduate trainee, 4th year student of the faculty «Bridges and Tunnels», Siberian State Transport University, Novosibirsk, e-mail: vorozhbit9229@yandex.ru