

**ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ, ТЯГА ПОЕЗДОВ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ / RAILWAY  
ROLLING STOCK, TRAIN TRACTION AND ELECTRIFICATION**

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.93>

**СОЕДИНЕНИЕ ПРОВОДОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНЫМ ОБЖИМОМ**

Научная статья

**Самохвалова Ж.В.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-2666-9816;

<sup>1</sup> Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (j.samohvalova[at]samgups.ru)

**Аннотация**

Рассмотрены технологические возможности создания стыковых электрических соединений многопроволочных проводов путем прессования соединительных втулок давлением импульсного магнитного поля. Представлены результаты исследований образцов стыковых соединений: медного несущего троса М-120, алюминиевого вспомогательного провода А-185 и сталемедного биметаллического провода ПБСМ-95, а так и переходных соединений «алюминий – медь». В результате тепловых и электрических испытаний соединений установлено, что коэффициенты дефектности электрического контакта для всех рассмотренных видов соединяемых проводов ниже значений, установленных для соединений многопроволочных проводов контактной сети, выполненных методом опрессовки.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсное прессование, соединение многопроволочных проводов, электрические испытания.

**CONNECTION OF CONTACT SYSTEM WIRES BY MAGNETIC PULSE CRIMPING**

Research article

**Samokhvalova Z.V.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-2666-9816;

<sup>1</sup> Samara State Transport University, Samara, Russian Federation

\* Corresponding author (j.samohvalova[at]samgups.ru)

**Abstract**

Technological possibilities of creating junctural electrical joints of multiwire wires by pressing of connecting sleeves by pressure of pulsed magnetic field are examined. The results of research of junctural joints samples are presented: copper supporting cable M-120, aluminium auxiliary wire A-185 and steel-copper bimetallic wire PBSM-95, as well as transition joints "aluminium – copper". As a result of thermal and electrical tests of connections, it is established that the coefficients of defectiveness of electrical contact for all examined types of connected wires are lower than the values established for connections of multi-wire wires of the contact network made by the crimping method.

**Keywords:** magnetic pulse pressing, multiwire wire connection, electrical testing.

**Введение**

Анализ числа нарушений по видам устройств и элементов контактной сети на электрифицированных железных дорогах РФ [1] показал, что по частоте отказов провода и зажимы находятся, соответственно, на первом и третьем месте среди всех видов устройств и элементов контактной сети. Основная доля этих повреждений обусловлена недопустимыми превышениями температуры нагрева многопроволочных проводов в плашечно-болтовых зажимах. Коэффициенты дефектности соединений по нагреву и электросопротивлению, в этом случае зависят от качества механической затяжки болтового соединения [2].

Для увеличения эксплуатационной надежности соединений несущих тросов, вспомогательных проводов, электротяговых соединителей, перемычек дроссель-трансформаторов и других проводов контактной сети предложена технология магнитно-импульсного прессования стыковых соединительных втулок [3], [4], [5]. Магнитно-импульсное воздействие может быть использовано как для прессования соединителей, так и для изменения физико-механических характеристик поверхностных слоев материала деталей [6], [7].

Цель работы – исследование и оценка качества стыковых соединений многопроволочных элементов контактной сети, полученных магнитно-импульсным обжатием трубчатых соединительных втулок.

**Методы и принципы исследования**

Для изучения процесса формовки электрических соединителей импульсным магнитным полем были взяты образцы основных типов многопроволочных проводов: медный несущий троса М-120, алюминиевый вспомогательный провод А-185 и сталемедный биметаллический провод ПБСМ-95. Трубчатые соединительные втулки были изготовлены из меди М1 и алюминия А0.

При магнитно-импульсном деформировании параметры получаемых соединений проводов зависят как от исходных геометрических параметров соединительной втулки, так и от пространственно-временных параметров давления импульсного магнитного поля в процессе совместного деформирования соединительной втулки и жил провода. Изменение формы импульса давления возможно за счет управляемого последовательного включения нескольких блоков магнитно-импульсной установки [8]. Рабочим инструментом, который определяет форму эпуры

давления при магнитно-импульсной обработке, является индуктор. В экспериментах применялись индукторная система – многовитковый индуктор со сменными концентраторами магнитного поля. Диаметры рабочих отверстий в сменных концентраторах магнитного поля были выполнены, с учетом изоляции и технологического зазора, под соединительные трубчатые втулки с диаметрами от 16 до 28 мм, т.е. для охвата всех типоразмеров выбранных многопроволочных проводов. Длина рабочей зоны у концентраторов была от 6 до 15 мм, что позволяло изменять ширину зону действия импульса давления магнитного поля. Варьируемыми параметрами в экспериментах, кроме материала втулок, были ее длина и толщина стенки соединителя. Начальный наружный диаметр втулки и заданная толщина ее стенки в этом случае обеспечивали условие равнопрочности втулки и провода.

Макрошлифы поперечных разрезов полученных прессованных зажимов многопроволочных проводов получали с использованием шлифовально-полировального станка Griro IV. Металлографические исследования были выполнены с использованием оптического микроскопа МЕТАМ ЛВ-71, который был оснащен цифровой фотокамерой и связан с компьютером. Для анализа полученных изображений использовалась система IMEGE Expert Pro3.

Эксперименты по исследованию процесса прессования соединений проводов производилось на магнитно-импульсной установке МИУ-30. Ее собственная индуктивность 0,004 мкГн, суммарная емкость батареи конденсаторов 168 мкФ, максимально допустимое напряжение заряда блока конденсаторов 19 кВ, максимальная энергия заряда установки 30,3 кДж.

### Основные результаты

Исследование макрошлифов получаемых соединений показало, что при магнитно-импульсном прессовании соединительной втулки на многопроволочный провод сильно деформирует внутренняя поверхность соединительной втулки. Это следствие ее высокоскоростного соударения с витками провода при импульсном нагружении. Это приводит к возрастанию площади контакта втулки и проволок провода в соединении – по сравнению с обжатием соединителя гидравлическими прессами, и уменьшению величин переходных электрических сопротивлений у получаемых соединений проводов.

Анализ макрошлифов стыковых соединений многопроволочных проводов и соединительной втулки, полученных при оптимальной величине энергии заряда установки, показали, что в соединении имеет место контакт как втулки, так и отдельных проволок провода между собой, практически по всей их поверхности (рис. 1).



Рисунок 1 - Разрез соединения провода М-120 и медной втулки  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.93.1>

*Примечание: а) до прессования; б) после магнитно-импульсного обжима*

Окислы и грязь, вследствие высокоскоростного деформирования элементов соединения, вытесняются в небольшие локальные участки между отдельными проволоками, проволоками и соединителем (втулкой) (рис. 2). На большей поверхности как проволок, так и соединительной втулки и проволок, получается контакт ювенильных поверхностей.

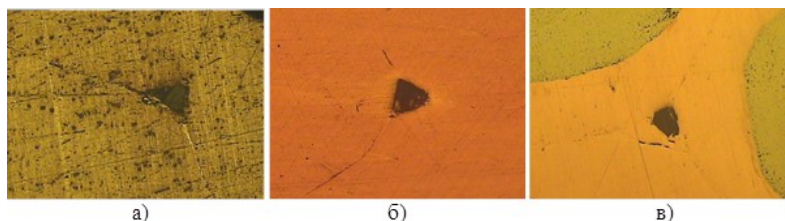


Рисунок 2 - Вид поверхностей контакта проволок и втулки и зоны вытеснения загрязнений в соединении провода и втулки

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.93.2>

*Примечание: а) А-185 + А0; б) М-120 + М1; в) ПБСМ-95 + М1*

Установлено, что состояние зон контакта между отдельными проволоками, а также между проволоками и внутренней поверхностью соединительного элемента в получаемом соединении зависит, в первую очередь, от величины удельной энергии заряда накопителей установки, отнесенной к объему деформируемого материала соединителя, определяющей начальную скорость соударения поверхности втулки с жилами наружного повива провода.

При прессовании переходных соединений медных и алюминиевых проводов импульсным давлением магнитного поля установлены существенные различия процесса образования прессового соединения медного провода М-120 и втулки из алюминия А0 и соединения алюминиевого провода А-185 и втулки из меди М1. В первом случае площадь поверхности контакта алюминиевой втулки с внешним повивом медного провода получается значительно больше, чем при напрессовке медной втулки на алюминиевый провод А-185 (рис. 3).

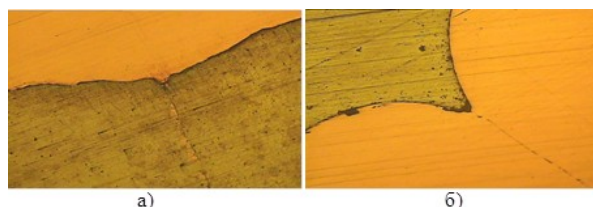


Рисунок 3 - Вид поверхности контакта прессового соединения провода и соединительной втулки  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.93.3>

Примечание: а) А-185 + М1; б) М-120 + А0

Это вызвано «затеканием» более мягкого материала алюминиевой втулки между отдельными проволоками медного провода, которое вызвано эффектом высокоскоростного соударения втулки с проводом при магнитно-импульсном деформировании. Более прочная медная втулка при высокоскоростном соударении сильно деформирует алюминиевые проволоочки. Но в обеих схемах возникает высокая степень плотности прессового соединения втулки и провода.

Эксперименты по испытанию зажимов проводов были выполнены в закрытом помещении лаборатории с применением теплового стенда. Проверка качества электрического соединения многопроволочных проводов, опрессованных импульсным давлением магнитного, проводили в соответствии с ГОСТ 12393-77 [9]. Качество полученного соединителя оцениваются коэффициентами дефектности по электрическому сопротивлению соединителя –  $K_R$  и по перегреву соединения условным номинальным током –  $K_q$ :

$$K_R = \Delta U_C / \Delta U_{\Pi}, K_q = \Delta \theta_C / \Delta \theta_{\Pi} \quad (1)$$

где  $\Delta U_C$  и  $\Delta U_{\Pi}$ , падение напряжения на соединителе и у целого провода такой же длины;  $\Delta \theta_C$  и  $\Delta \theta_{\Pi}$ , возрастание температуры соединителя (втулки) и соединяемых проводов вне соединителя над температурой воздуха в помещении, при протекании по ним одинакового тока.

Величину электрического тока нагрузки для определения коэффициентов дефектности обеспечивали для каждого типоразмеров соединяемых проводов с учетом допустимой длительной величины тока, определенной нормативно-технической документацией (400, 500 или 600 А) [10]. Сила тока поддерживалась постоянной (с погрешностью не более 3%) в течении всего процесса испытания. Сила тока измерялась мультиметром Masteh MY-62. Измерение температур нагрева соединения, по центру соединительной втулки, и провода на расстоянии 1 м от зажима производили термопарами, применяя цифровой мультиметр APPA 109 (класс 0,1). Измерение падения напряжения на целом проводе и в зажиме проводов (для каждого выбранного значения силы тока) производилось по цифровому мультиметру Masteh M890G (класс 0,1). Величину коэффициента дефектности по сопротивлению определяли как среднее арифметическое по трем значениям, полученным при трех различных величинах тока.

Величина коэффициентов дефектности соединений была установлена для стыковых соединений несущих тросов: медного монометаллического М-120 и сталемедного биметаллического ПБСМ-95, при использовании медных соединителей. Для стыковых соединений вспомогательного монометаллического алюминиевого провода А-185 использовались алюминиевые соединители. Для переходных соединений медного провода М-120 с алюминиевым проводом А-185 применялись, как алюминиевые, так и медные соединители.

### Обсуждение

Установлено, что температура нагрева полученного соединения во всех случаях значительно ниже температуры нагрева самого провода вне зоны прессового соединения (таблица 1). Эти значения ниже допустимой величины коэффициентов дефектности, которые установлены для соединений многопроволочных проводов контактной сети железных дорог, выполняемых методом опрессовки [9].

Таблица 1 - Коэффициенты дефектности стыковых соединений многопроволочных проводов при магнитно-импульсном прессовании

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.137.93.4>

Коэффициент дефектности соединения	Соединяемые многопроволочные провода контактной сети			
	медные M120+M120	алюминиевые A185+A185	биметаллические ПБСМ95+ПБСМ 95	Переходное соединение M120+ A185
$K_q$	0,85	0,86	0,66	0,88
$K_R$	0,67	0,7	0,56	0,74

Установлено, что при высокоскоростном соударении втулки и проволок и при их последующем совместном деформировании возникают большие поверхностные сдвигающие напряжения и контактные давления. В результате, в процессе прессования стыковых зажимов многопроволочных проводов, при магнитно-импульсном нагружении, протекает частичное самоочищение и притирание контактирующих поверхностей проволок. Вследствие этого окислы и грязь на контактирующих поверхностях вытесняются в малые локальные участки между проволоками, проволоками и втулкой. Это обеспечивает большую площадь контакта ювенильных поверхностей на проволоках и втулке.

Установлено, что при магнитно-импульсном прессовании электрических соединителей, вследствие высоких скоростей деформации и действия больших инерционных сил, деформации локализируются в зоне действия импульсной нагрузки. В результате все проволоки в местах контакта друг с другом и со втулкой имеют огранку, а сама стенка соединителя практически не утоняется. В отличие от прессования соединителей гидравлическими прессами, при магнитно-импульсном прессовании практически не происходит уменьшения площади поперечного сечения проволок провода.

### Заключение

1. Вследствие взаимного деформирования и смещения поверхностных объемов материалов проволок и соединителя при магнитно-импульсном прессовании стыковых зажимов многопроволочных проводов создается плотный механический контакт. Это обеспечивает минимальное переходное электрическое сопротивление и стабильное качество электрического контакта в прессовом соединении.

2. При прессовании зажимов давлением импульсного магнитного поля происходит компактирование проволок провода внутри втулки и плотность заполнения сечения в стыковом зажиме приближается к 100%. Это позволяет обеспечить высокую степень герметичности в соединении, что в значительной мере исключает окисление контактирующих поверхностей и повышение переходного электрического сопротивления зажима в процессе эксплуатации.

3. Обработка результатов проведенных тепловых и электрических испытаний стыковых соединителей многопроволочных, полученных магнитно-импульсным прессованием, показала, что коэффициенты дефектности прессового соединения как по нагреву, так и по электрическому сопротивлению значительно ниже единицы для всех типоразмеров и видов проводов. Это гарантирует высокую эксплуатационную надежность стыковых электрических зажимов многопроволочных проводов контактной сети.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Галкин А.Г. Математическое моделирование и информационные технологии в задачах диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог / А.Г. Галкин, А.Н. Митрофанов, С.А. Митрофанов. — Екатеринбург: Уральский государственный университет путей сообщения, 2012. — 226 с.
2. Ignatenko I.V. Health Assessment of the Electrical Contact-line Connections in View of the Operational Traction Load Pattern of the Electric Rolling Stock / I.V. Ignatenko, S.A. Vlasenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Novosibirsk, 2020. — P. 012154. — DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012154.
3. Самохвалов В.Н. Магнитно-импульсный метод получения прессуемых зажимов многопроволочных проводов контактной сети / В.Н. Самохвалов, Ж.В. Самохвалова, В.С. Целиковская // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. — 2012. — № 3. — С. 53-57.
4. Самохвалова Ж.В. Исследование процесса магнитно-импульсной сборки проводов контактной подвески / Ж.В. Самохвалова, В.Л. Григорьев, В.Н. Самохвалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2006. — № 3(23). — С. 25-30.
5. Samokhvalov V.N. Enhancing of Operational Reliability of Catenary and Electric Rolling Stock Wire Connections / V.N. Samokhvalov, Z.V. Samokhvalova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific-

Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019, Vol. 666. — St. Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. — P. 012068. — DOI 10.1088/1757-899X/666/1/012068.

6. Авторское свидетельство № 1759947 А1 СССР, МПК С22F 1/00, С21D 1/04. Способ обработки изделий: № 4861081: заявл. 20.08.1990: опубл. 07.09.1992 / В.Н. Самохвалов, Г.М. Лебедев, В.Ф. Цуканов, Т.А. Голиусов.

7. Самохвалов В.Н. Магнитно-импульсная и электроимпульсная обработка деталей машин / В.Н. Самохвалов, Ж.В. Самохвалова // Современные проблемы теории машин. — 2017. — № 5. — С. 113-115.

8. Авторское свидетельство № 1570129 А1 СССР, МПК В21D 26/14. Способ магнитно-импульсной обработки материалов: № 4333054/27: заявл. 24.11.1987: опубл. 20.05.1999 / В.А. Глушченков, В.Н. Самохвалов, Р.Ю. Юсупов [и др.].

9. ГОСТ 12393-77. Арматура контактной сети для электрифицированных железных дорог. Общие технические условия. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 26 с.

10. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). — М.: Трансиздат, 2002. — 184 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Galkin A.S. Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii v zadachakh diagnostiki kontaktnoi seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog [Mathematical Modeling and Information Technologies in Diagnostics of the Contact Network of Electrified Railways] / A.S. Galkin, A.N. Mitrofanov, S.A. Mitrofanov. — Yekaterinburg, Ural State University of Railway Transport Publ., 2012. — 226 p. [in Russian]

2. Ignatenko I.V. Health Assessment of the Electrical Contact-line Connections in View of the Operational Traction Load Pattern of the Electric Rolling Stock / I.V. Ignatenko, S.A. Vlasenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Novosibirsk, 2020. — P. 012154. — DOI 10.1088/1757-899X/918/1/012154.

3. Samokhvalov V.N. Magnitno-impul'snyj metod polucheniya pressuemykh zazhimov mnogoprovodnykh provodov kontaktnoj seti [Magnetic-pulse Method for Obtaining Pressable Clamps of Multi-wire Wires of the Contact Network] / V.N. Samokhvalov, Zh.V. Samokhvalova, V.S. Tselikovskaya // Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta [Bulletin of the Research Institute of Railway Transport], 2012. — №3. — P.53-57. [in Russian]

4. Samokhvalova Zh.V. Issledovanie processa magnitno-mpul'snoj sborki provodov kontaktnoj podveski [Investigation of the Process of Magnetic-pulse Assembly of Contact Suspension Wires] / Zh.V. Samokhvalova, V.L. Grigoriev, V.N. Samokhvalov // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya [Bulletin of Rostov State University of Transport], 2006. — №3 (23). — P. 25-30. [in Russian]

5. Samokhvalov V.N. Enhancing of Operational Reliability of Catenary and Electric Rolling Stock Wire Connections / V.N. Samokhvalov, Z.V. Samokhvalova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Scientific-Practical Conference on Quality Management and Reliability of Technical Systems 2019, Vol. 666. — St. Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. — P. 012068. — DOI 10.1088/1757-899X/666/1/012068.

6. Copyright certificate USSR № 1759947 А1, IPC С22F 1/00, С21D 1/04. Sposob obrabotki izdelij [Product Processing Method]: № 4861081: application. 08.20.1990: publ. 09.07.1992 / V.N. Samokhvalov, G.M. Lebedev, V.F. Tsukanov, T.A. Goliusov. [in Russian]

7. Samokhvalov V.N. Magnitno-impul'snaya i elektroimpul'snaya obrabotka detalej mashin [Magnetic-pulse and Electric-pulse Processing of Machine Parts] / V.N. Samokhvalov, Zh.V. Samokhvalova // Sovremennye problemy teorii mashin [Modern Problems of Machine Theory]. — 2017. — No. 5. — P. 113-115. [in Russian]

8. Copyright certificate USSR № 1570129 А1, IPC В21D 26/14. Sposob magnitno-impul'snoj obrabotki materialov [Method of Magnetic Pulse Processing of Materials]: № 4333054/27: application. 11.24.1987: publ. 05.20.1999 / V.A. Glushchenkov, V.N. Samokhvalov, R.Yu. Yusupov [et al.]. [in Russian]

9. GOST 12393-77. Armatura kontaktnoi seti dlia elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog. Obshchie tekhnicheskie usloviia [State Standard 12393-77. Armature of the Contact Network for Electrified Railways. General Specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2004. — 26 p. [in Russian]

10. Pravila ustroistva i tekhnicheskoi ekspluatatsii kontaktnoi seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog (TsE-868) [Rules of the Device and Technical Operation of the Contact Network of Electrified Railways]. Department of Electrification and Electricity of the Ministry of Railways of the Russian Federation. Moscow, Transizdat Publ., 2002. — 184 p. [in Russian]