



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СВАРКЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ ТЕРМИТНЫМ СПОСОБОМ

Галай Марина Сергеевна,

кандидат технических наук, доцент,
Сибирский государственный университет путей
сообщений
Новосибирск, Россия
E-mail: galayms@mail.ru

Сидоров Эдуард Сергеевич,

Сибирский государственный университет путей
сообщений
Новосибирск, Россия
E-mail: sesnsk@mail.ru

Предмет исследования: изучение процесса распределения тепла при термитной сварке железнодорожных рельсов.

Цель исследования: изучение процесса теплообмена системы «литейная форма – сварной шов – рельс» путем моделирования в специальной программе для литейных процессов LVMFlow.

Методы и объекты исследования: объектом исследования являются сварные соединения рельсов. Метод исследования – моделирование процесса термитной сварки рельсов в программном продукте LVMFlow.

Основные результаты исследования: разработаны 3D-модели теплообмена системы «литейная форма – сварной шов – рельс» с учетом фазовых переходов. На основе предложенных моделей представлены термограммы распределения температурных полей как по сечению сварного соединения, так и по длине сварного соединения. Результаты моделирования подтверждены результатами натуральных экспериментов.

Ключевые слова: моделирование, сварной шов, теплообмен, распределение температуры, сварка.

MODELING OF THE HEAT TRANSFER PROCESS DURING THERMITE WELDING OF RAILWAY RAILS

Marina S. Galay

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Siberian Transport University
Novosibirsk, Russia
E-mail: galayms@mail.ru

Eduard S. Sidorov

Siberian Transport University
Novosibirsk, Russia
E-mail: sesnsk@mail.ru

Subject of research: study of heat distribution process during thermite welding of railway rails

The purpose of the study: to study the heat exchange process of the “mold – weld – rail” system by modeling in a special program for casting processes LVMFlow product.

Methods and objects of research: the object of research is rails welded joints. The research method is modeling the thermite welding process of rails in the LVMFlow software product.

The main results of the study: 3D models of heat transfer of the casting “mold – weld – rail” system have been developed taking into account phase transitions. Based on the proposed models distribution temperature thermograms fields are presented along section of welded joint and along length of the welded joint. The simulation results are confirmed by results of experiments.

Keywords: modeling, weld, heat transfer, temperature distribution, welding.

ВВЕДЕНИЕ

Термитная сварка рельсов используется на сети железных дорог при создании бесстыкового пути уже много лет, однако до сих пор имеется ряд проблем, связанных как с технологией производства данной сварки, так и с качеством сварных соединений. Технология термитной сварки рельсов состоит из трех этапов: подготовительного этапа, процесса сварки и послесварочного этапа (рисунок 1). Подготовительный этап заключается в установке тигля и заполнении его термитной смесью, формировании сварочного зазора между рельсами и установке литейной формы, подогрева концов рельсов. Процесс сварки осуществляется путем воспламенения термитной смеси, в результате плавления которой происходит экзотермическая реакция с выделением большого количества тепла. После завершения реакции жидкий расплав вытекает из тигля в литейную форму, заполняя сварочный зазор между рельсами.

По окончании процесса кристаллизации сварочной ванны приступают к послесварочным операциям: демонтаж сварочного оборудования, удаление грата с головки рельсов и литников, шлифование поверхности катания головки рельсов в области сварного соединения [1-5].

Из описания технологического процесса термитной сварки рельсов видно, что данный вид сварки в большей степени относится к металлургическому процессу разливки металла в форму. Поэтому в сварных соединениях рельсов, полученных термитной сваркой, чаще наблюдаются дефекты, которые присущи отливкам: раковины, шлаковые включения, пузыри, горячие трещины в литом металле (рисунок 2).

Дефекты литья являются трудновывяемыми дефектами, поскольку термитный сварной шов отличается от материала рельса, поэтому при проведении контроля средствами дефектоскопии возможна регистрация ложных сигналов [6, 7].



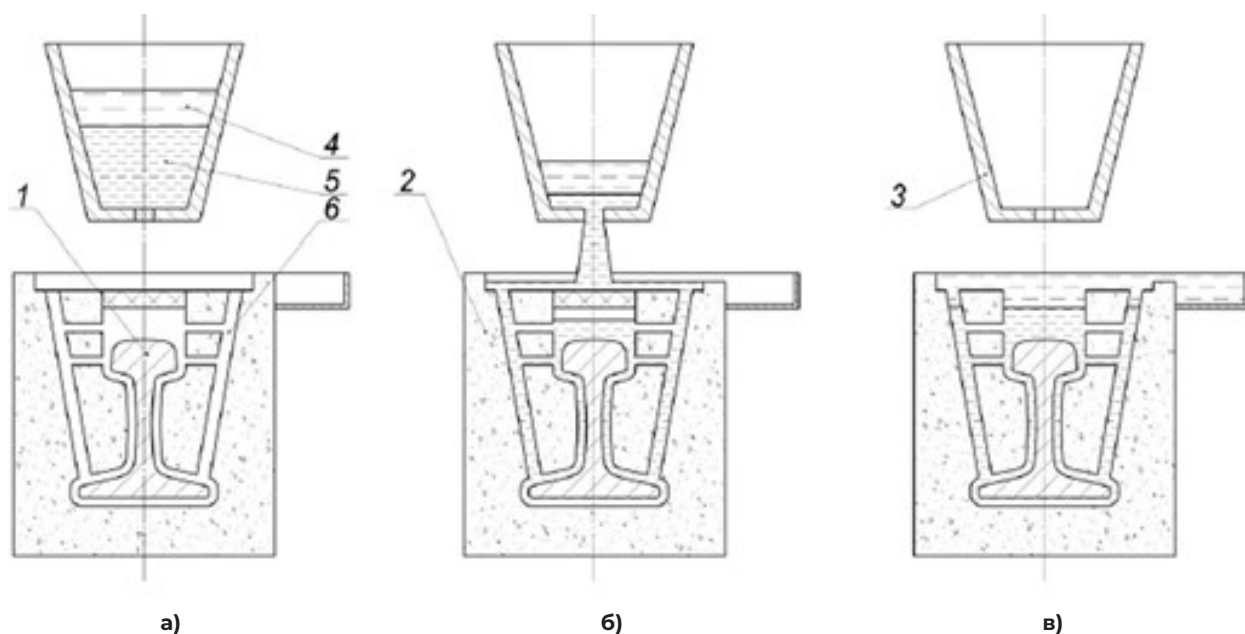


Рисунок 1. Схема термитной сварки рельсов: а – плавление термитной смеси; б – заливка расплавленной термитной смеси в форму; в – кристаллизация сварного шва; 1 – рельс, 2 – форма, 3 – тигель, 4 – расплавленный шлак, 5 – расплавленный металл, 6 – литник.

Образование дефектов литья при термитной сварке рельсов зависит от характера кристаллизации расплава в литейной форме, который, в свою очередь, определяется тепловыми процессами, происходящими в системе «литейная форма – сварной шов – рельс». Однако изучение теплообмена системы «литейная форма – сварной шов – рельс» представляет собой сложную задачу, поскольку нет возможности установить датчики измерения температуры в литейной форме и в сварном шве, так как заливаемый металл имеет высокую температуру (2300 ... 2800 °С) и может

повредить датчики [1]. Поэтому изучение процесса теплообмена термитной сварки целесообразно проводить с использованием программных продуктов. В настоящее время для моделирования процесса сварки рельсов используются различные пакеты программного обеспечения [8-11]. В данной статье представлена модель, разработанная в среде LVMFlow, в которой учтены процессы теплообмена системы «литейная форма – сварной шов – рельс», и она позволяет определить температуру в процессе кристаллизации сварного соединения.



а)



б)

Рисунок 2. Дефекты сварных соединений рельсов, полученных термитной сваркой: а) раковина в головке рельса, б) раковины в подошве рельса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Доминирующее влияние на изменение температуры в термитных сварных швах оказывает теплопроводность. Таким образом, энергетический баланс внутри исследуемого термитного сварного соединения задается как:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla(\lambda \nabla T), \quad (1)$$

где $\frac{\partial T}{\partial t}$ – изменение температуры, $\frac{\partial Q}{\partial t}$ – скорость тепловыделения, C_p – удельная теплоемкость, λ – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность материала.

Из-за сложной природы термитной сварки трудно включить все физические явления в одну модель. Поэтому другие термически значимые физические процессы теплообмена в период сварки: затвердевание, тепловая конвекция и излучение представлены в модели через свойства материала, граничные и начальные условия.

В процессе термитной сварки рельсов осуществляются процессы плавления и кристаллизации, которые сопровождаются фазовыми переходами, поэтому необходимо учесть скрытую теплоту. Существует несколько способов учета скрытого тепла, выделяемого (или поглощаемого) во время этих фазовых превращений. В нашем случае было включено скрытое тепло через удельную теплоемкость:

$$C_p = \frac{i_2(T_2) - i_1(T_1)}{dT}, \quad (2)$$

где $i_2(T_2) - i_1(T_1)$ – изменение энтальпии, dT – температура.

Численное моделирование осуществляли в среде LVMFlow. При моделировании процесс термитной сварки рельсов был разделен на две стадии. Первая стадия – это время от момента заливки металла в литейную форму и до момента удаления литейной формы и излишков металла. Вторая стадия – это время от снятия литейной формы и до полного остывания сварного шва. Для двух стадий были построены две модели (рисунок 3).

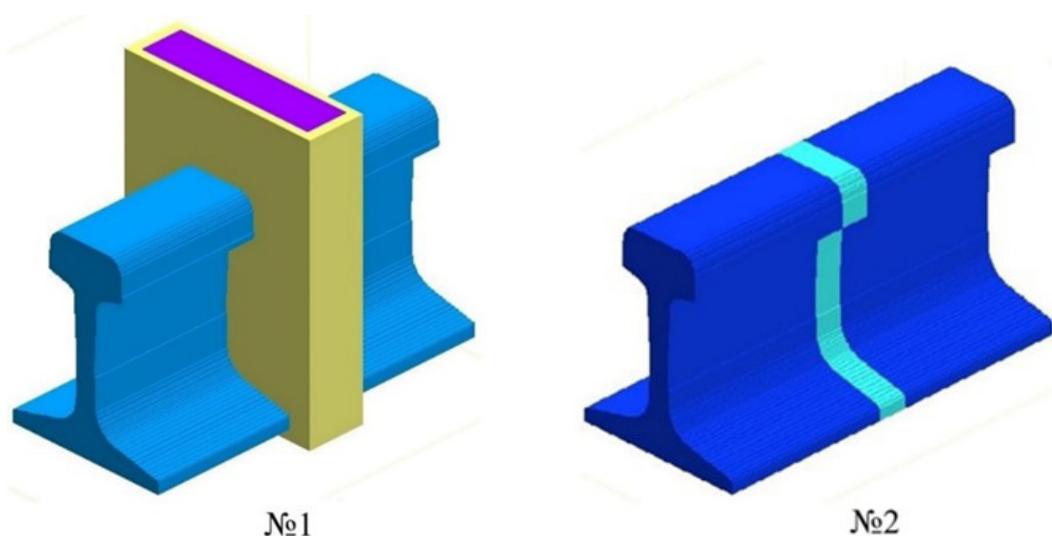


Рисунок 3. Трехмерные модели термитных сварных соединений рельсов: № 1 – модель сварного соединения с литейной формой, № 2 – модель сварного соединения без литейной формы.

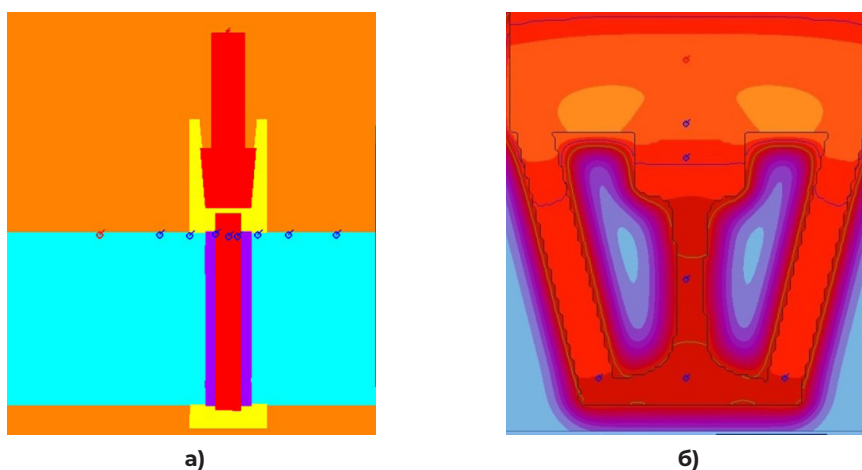
Модель № 1, состоящая из двух соединяемых рельсов, сварного шва, литейной формы, литников и прибыльной части. Модель № 2, состоящая из двух рельсов и сварного шва, необходима для того, чтобы оценить изменение температуры металла в зоне сварного шва. Проектирование моделей выполняли с помощью САПР «КОМПАС-3D». Размеры профиля моделей свариваемых рельсов соответствовали значениям, указанным в нормативной документации [12, 13]. Полученные в результате проектирования объекты были конвертированы в формат, поддерживаемый

программным комплексом LVMFlow. При конвертировании задан размер ячеек разностной сетки равный 1 мм, что позволило обеспечить высокую точность вычислений в процессе моделирования охлаждения термитных сварных соединений рельсов за счет соответствия формы и размеров моделей реальным объектам. При моделировании были приняты начальные условия, приведенные в таблице 1.

Продолжительность процесса охлаждения модели с литейной формой при моделировании (модель № 1) была такой же,

Таблица 1. Начальные условия для моделирования процесса термитной сварки

	Модель № 1 (с литейной формой)	Модель № 2 (без литейной формы)
Марка рельсовой стали	Сталь 76ХФ	
Материал сварного шва	Сталь 60	
Материал формы	Кварцевый песок	
Температура заливаемого металла, °C	2500	-
Температура металла сварного шва, °C	2500	1500
Температура концов свариваемых рельсов, °C	850	1200
Температура литейной формы, °C	850	-
Температура воздуха окружающей среды, °C	20	
Плотность рельсовой стали и материала шва, кг/м ³	7800	
Плотность материала формы, кг/м ³	1600	

**Рисунок 4.** Размещение температурных датчиков при моделировании: а) по длине рельса, б) по сечению рельса.

как при сварке рельсов в условиях пути по технологической инструкции [4] и составила 660 секунд. Именно столько времени необходимо для кристаллизации металла головки рельса в зоне сварного шва. Преждевременное удаление литейной формы приводит к утечке не кристаллизовавшегося металла и повреждению рельса. Более длительное ожидание увеличивает общую продолжительность технологического процесса сварки рельсов. Начальные температуры для модели № 2 определены экспериментально, по результатам первого этапа моделирования с литейной формой (модель № 1). Во время демонтажа литейной формы температура сварного шва составляет порядка 1500 °C, а температура концов свариваемых рельсов составляет в среднем 1200 °C. Показания температуры при моделировании термитных сварных стыков получали с датчиков (рисунок 4), установленных по сечению сварного шва и по длине сварного соединения рельса.

На рисунке 5 представлены результаты моделирования теплообмена системы «литейная форма – сварной шов – рельс». Модели 1–4 отображают изменение температуры с момента заливки жидкого металла в литейную форму до момента её демонтажа. Наибольший отвод тепла происходит в свариваемые рельсы. При этом подошва рельса и шейка рельса охлаждаются быстрее, чем головка. Это объясняется тем, что над головкой рельса имеется прибыльная часть, в которой в последнюю очередь происходит кристаллизация сплава.

Модели 5–8 показывают распределение температуры после удаления литейной формы. Следует отметить, что при термитной сварке происходит кристаллизация большой массы металла, это приводит к тому, что процесс кристаллизации в различных объемах происходит одновременно, что подтверждается данными на моделях 5–8. Разная скорость охлаждения способствует образованию различных структур, соответственно, свойств материала.

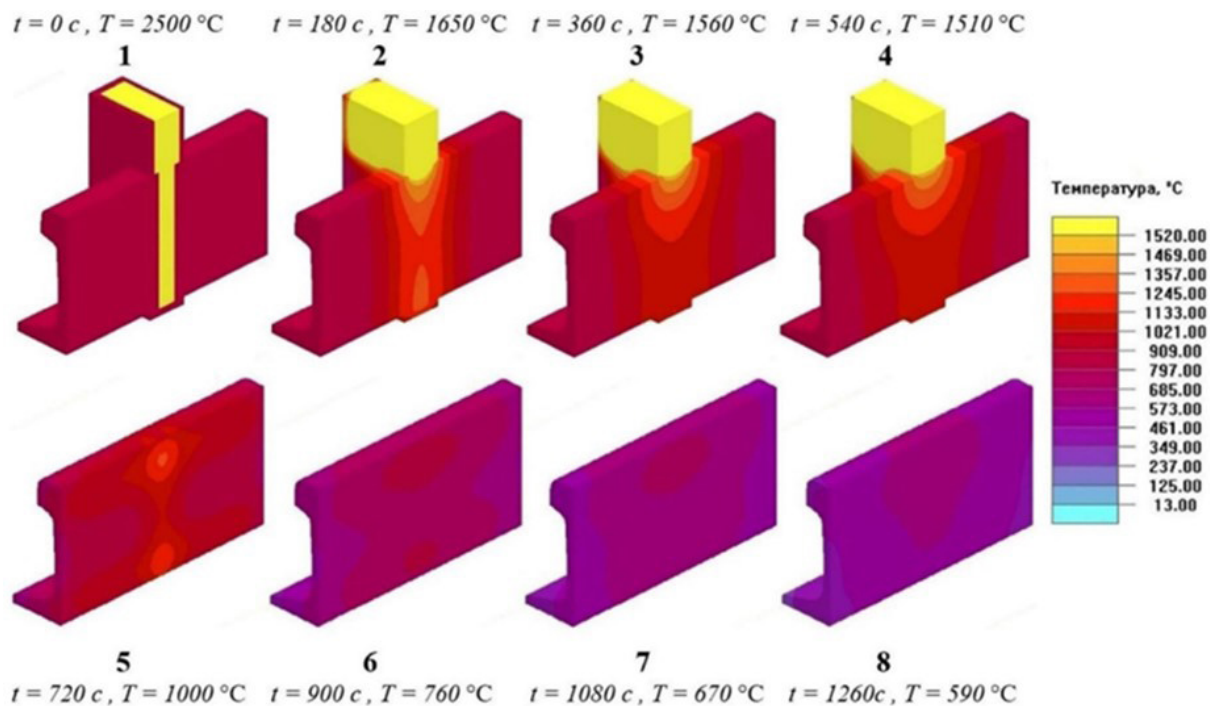


Рисунок 5. Распределение тепла по термитному сварному соединению рельсов: 1 – момент заливки жидкого сплава в литейную форму; 2 – 180 с после заливки сплава в литейную форму; 3 – 360 с после заливки сплава в литейную форму; 4 – 540 с после заливки сплава в литейную форму; 5 – 720 с после заливки сплава в литейную форму; 6 – 900 с после заливки сплава в литейную форму; 7 – 1080 с после заливки сплава в литейную форму; 8 – 1260 с после заливки сплава в литейную форму.

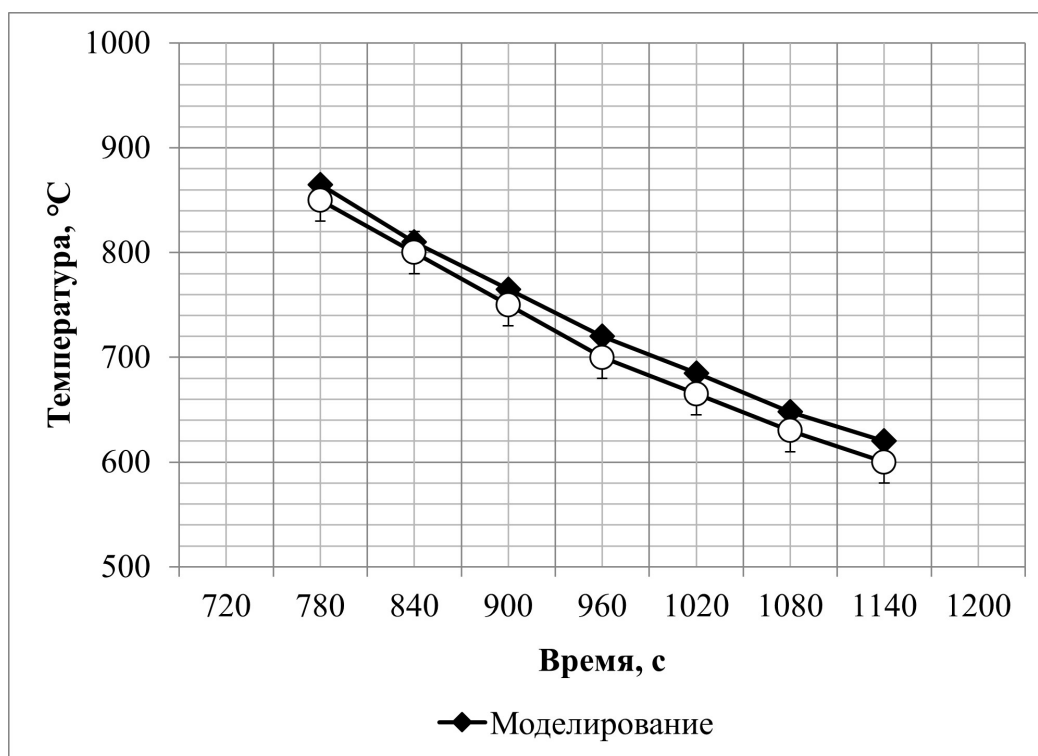


Рисунок 6. Температура поверхности катания головки рельса в зоне сварного шва после удаления литейной формы.

Результаты моделирования были подтверждены экспериментальным путем. С помощью цифрового пирометра Mastech MS6550A измеряли температуру поверхности головки рельса в зоне сварного шва после удаления литейной формы.

На рисунке 6 приведены графики, отражающие изменения температуры сварных швов в процессе моделирования и при проведении эксперимента. Экспериментальные значения на 15 ... 20 °C ниже результатов моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Следовательно, значения температур, полученные при моделировании и в результате проведения эксперимента, отличаются менее чем на 5 %. Таким образом, эксперимент показал, что разработанная модель термитных сварных соединений рельсов имеет достаточно высокую точность и может быть использована в технологическом процессе сварки рельсов термитным способом для определения температуры поверхности катания сварных швов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Пасько, С. В. Алюмотермитная сварка рельсов методом промежуточного литья: учебное пособие / С. В. Пасько, Л. Б. Тихомирова, О. В. Болотова – Новосибирск: Издательство СГУПС, 2010 – 76 с. – Текст : непосредственный.
- Воронин, Н. Н. Алюминотермитная сварка рельсов: учебное пособие / Н. Н. Воронин, В. В. Засыпкин, В. И. Коненков, Э. В. Воробьев, О. Н. Трынкова – М.: Изд. «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 195 с. – Текст : непосредственный.
- Давыдкин, А. В. Особенности алюминотермитной сварки рельсов / А. В. Давыдкин, С. В. Николаев. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2017. – № 3. – С. 26–27.
- ТУ 24.10.75–337–01124323–2019. Рельсы железнодорожные, сваренные термитным способом. Технические условия. Введ. 01.08.2019. – М.: АО «ВНИИЖТ», 2019. – 68 с. – Текст : непосредственный.
- Козырев, Н. А. Современные методы сварки рельсов нового поколения / Н. А. Козырев, А. А. Усольцев, Р. А. Шевченко, Р. Е. Крюков, П. Е. Шишкин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2017. – Том 60. – № 10. – С. 785–791.
- Брандис, М. П. Ультразвуковой контроль стыков алюминотермитной сварки рельсов / М. П. Брандис, В. П. Глотов. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 32–36.
- Рукавчук, Ю. П. Дефектность стыков алюминотермитной сварки рельсов / Ю. П. Рукавчук, С. А. Рождественский, И. З. Этинген. – Текст : непосредственный // Путь и путевое хозяйство. – 2011. – № 4. – С. 26–27.
- Быков, П. О. Современные компьютерные системы синтеза и анализа литейных технологий / П. О. Быков, В. Я. Шевченко. – Текст : непосредственный // Наука и техника Казахстана. – 2005. – № 1. – С. 10–18. – ISSN 1680-9165.
- Малькова, Н. Ю. Разработка технологии изготовления отливок с использованием систем компьютерного моделирования / Н. Ю. Малькова, Е. А. Кошелева, И. В. Марширов, Ю. В. Исаева. – Текст : непосредственный // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 77–80.
- Ильиных, А. С. Совершенствование технологии алюминотермитной сварки рельсов на основе программного моделирования / А. С. Ильиных, М. С. Галай, Э. С. Сидоров, С. В. Щелоков. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4(59). – С. 16–21.
- Jovanović, G. Model development for casting simulation of railway aluminothermic welding // Jovanović G., Delic A., Manojlović V., Sokić M., Gavrilovski M. // Tehnika. – 2023. – V. 78. – pp. 425–430. – DOI: 10.5937/tehnika2304425J.
- ТУ 159000-001-72253988-2009. Форма для алюминотермитной сварки. Технические условия. Введ. 20.04.2009. – М.: ЗАО «СНАГА», 2009.
- ГОСТ 34664–2020. Рельсы железнодорожные, сваренные термитным способом. Технические условия. – Введ. 2021–03–01. – М.: Стандартинформ, 2020. – 15 с.