

**СВАРКА, РОДСТВЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ
WELDING, RELATED PROCESSES AND TECHNOLOGIES**

Научная статья

УДК 625.143.482

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-26-41

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТОРЦОВ РЕЛЬСОВ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ БЕЗ ТЕРМИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ****Чумачков Илья Игоревич,
Коновалов Сергей Валерьевич**

Сибирский государственный индустриальный университет

* для корреспонденции: I.I.Chumachkov@yandex.ru

**Информация о статье**

Поступила:

27 октября 2025 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 января 2026 г.

Принята к публикации:

12 февраля 2026 г.

Опубликована:

19 марта 2026 г.

Ключевые слова:

Электроконтактная сварка,
железнодорожные рельсы,
сварное стыковое соединение,
профиль, трехточечный изгиб,
микроструктура,
механические свойства,
остаточные напряжения

Аннотация.

Наиболее уязвимыми к образованию и развитию дефектов в сваренных рельсах являются места их соединения. В области сварки в результате действия температурного градиента возникают зоны пониженной твердости. В таких областях развиваются трещины и выкрашивания, которые впоследствии могут приводить к нарушению целостности сварной плети. Изменение геометрии торцов рельсов перед сваркой позволяет формировать сварной шов контролируемой формы, перераспределять напряжения в стыке и повышать его прочность. Изменение угла наклона торцов вдоль оси прокатки способствует снижению динамического удара при эксплуатации рельсов в пути.

Цель работы заключается в продолжении исследования влияния геометрии торцов рельсов типа R65 категории ДТ350 на механические свойства и остаточные напряжения сварных соединений без проведения термической обработки. Рассмотрены шесть опытных конфигураций, полученных при сварке методом пульсирующего оплавления на машине МСР-63.01А из проб длиной 650 мм с различной формой торцов.

Показано, что изменение угла наклона торцов приводит к перераспределению напряжений в зоне стыка и изменяет эпюру остаточных напряжений. Сварка рельсов с торцами под углом 20° обеспечивает оптимальные механические свойства: разрушающая нагрузка составила 2173 кН при стреле прогиба 27,8 мм. Изменение угла наклона с горизонтального на вертикальный увеличивает прочность и пластичность (до 2235 кН и 32,7 мм), однако приводит к нарушению геометрии стыка и делает невозможной последующую горячую правку.

Для цитирования: Чумачков И.И., Коновалов С.В. Влияние геометрии торцов рельсов на качественные характеристики сварного соединения без термической обработки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 1 (173). С. 26-41. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-26-41, EDN: XQWPEF

Введение (Introduction)

При эксплуатации железнодорожных рельсов наиболее уязвимыми к образованию и развитию дефектов являются места их соединения. Несмотря на существенное увеличение срока

службы по сравнению со звеньевыми соединениями, сварные стыки, выполненные методом электроконтактной или алюмотермитной сварки, также подвержены интенсивному развитию дефектов, таких как

трещины, выкрашивания, смятия и износ. Формирование и развитие указанных дефектов происходит на поверхности катания головки рельса в областях с пониженной твердостью – в зонах термического влияния, возникающих в результате локальной термической обработки, повсеместно применяемой на РСП с целью повышения прочности и пластичности сварного соединения [1, 2, 3].

Теоретически данную проблему можно решить путем применения термической обработки рельсовых плетей с использованием индукционного нагрева в проходном режиме, при котором каждое поперечное сечение рельса последовательно подвергается нагреву и последующему охлаждению [5, 6]. Такой подход обеспечивает наиболее однородную структуру по всей длине плети. Тем не менее, отсутствие прототипов сварных стыков, оценки их потребительских свойств и экономической эффективности в реальных условиях эксплуатации, высокие капиталовложения на переоборудование РСП, отсутствие нормативно-технической документации на этот вид продукции и ряд других ограничений не позволяют в данный момент перейти к реализации и внедрению данной технологии в производство [7].

Альтернативным направлением улучшения качества стыкового соединения является разработка технологии сварки, обеспечивающей высокие показатели прочности, пластичности, вязкости и трещиностойкости стыка без применения дополнительной термической обработки. Алмотермитная сварка в данном контексте не рассматривается, так как несмотря на низкую стоимость, высокую мобильность и отсутствие термообработки она не может обеспечить необходимые качественные показатели стыка и достаточно длительный срок его службы [8, 9, 11].

Более перспективным является использование индукционных сварочных агрегатов [10]. В сравнении с электроконтактной сваркой такие машины обладают меньшей ресурсоемкостью. Разогрев поверхности торцов вихревыми токами снижает интенсивность оплавления металла и не требует проведения дополнительной термообработки для получения качественных соединений. Данный вид сварки используется в Японии, Великобритании и Франции для получения рельсовых плетей из нетермоупрочненных рельсов [10, 13, 14]. Однако до настоящего времени технология индукционной сварки не была применена и оценена с точки зрения обеспечения эксплуатационных свойств отечественных рельсов, которые работают в наиболее сложных условиях и в термоупрочненном виде.

Ограничение распространения данной технологии обусловлено отсутствием на рынке РФ поставщиков индукционных сварочных машин, а также высокими капитальными затратами на их разработку и внедрение.

Таким образом, в настоящее время необходимо решение, позволяющее обеспечить качественное сварное соединение с высокими показателями пластичности, прочности, вязкости и трещиностойкости, без дополнительной термической обработки, с эффективным использованием имеющегося оборудования и с минимальными капиталовложениями. Необходимое решение может быть достигнуто за счет внесения изменений в действующий технологический процесс.

Так, авторы патента RU 2 809 616 C1 рассматривают способ повышения равномерности нагрева торцов рельсов за счет создания на поверхности выступов не менее 2 мм и не более 10 мм в форме пирамид или конусов. Технический результат предлагаемого решения позволяет повысить равномерность разогрева поверхностей у основания выступов и уменьшить влияние косины на стабильность процесса сварки, а также сократить количество подводимой энергии и время ее воздействия для разогрева всей поверхности контакта, тем самым уменьшить размеры ЗТВ и увеличить прочность сварного соединения.

Сопоставимое техническое решение представлено в патенте RU 2 777 495 C1, в котором контролируют стабильность первого этапа оплавления при электроконтактной сварке, управляя вероятностью образования искровых промежутков за счет вставки в виде металлической сетки. Ближайшим аналогом данного решения является патент RU 2836940 C1. В стык вводится специальная рельефная вставка, которая обеспечивает устойчивость оплавления, уменьшает время сварки и повышает стойкость рельсового стыка к динамическим воздействиям.

Альтернативный вариант воздействия на стык описан в патенте RU 2 663 759 C2. Авторы предлагают использовать скошенный шов для повышения прочности и надежности сварного соединения. В работе проводили эксперимент по сварке рельсов типа Р65. Способ соединения рельсов включал обрезку торцов рельсов под углом $45^\circ (\pm 15^\circ)$ вместо предусмотренного действующей НТД «перпендикулярного» торца [15] и их сварку запатентованным дуговым методом. Угловые сварные стыки испытывали на статический трехточечный изгиб. Результаты опытных стыков превосходили аналогичные, выполненные под углом 90° к продольной оси рельсов.

Исследователи в работе рассматривают подход к сварке рельсов алюмотермитным методом с торцами, «скошенными» под углом 30° и 45° , вместо перпендикулярного (90°) соединения [12]. Рассматриваемая форма снижает нагрузку на сварной шов за счет распределения продольных, тепловых и остаточных напряжений. В работе проведены испытания на усталость, анализ микроструктуры и твердости. Некоторые образцы превысили нормативные требования по числу циклов усталости при нагрузках, близких к стандартным.

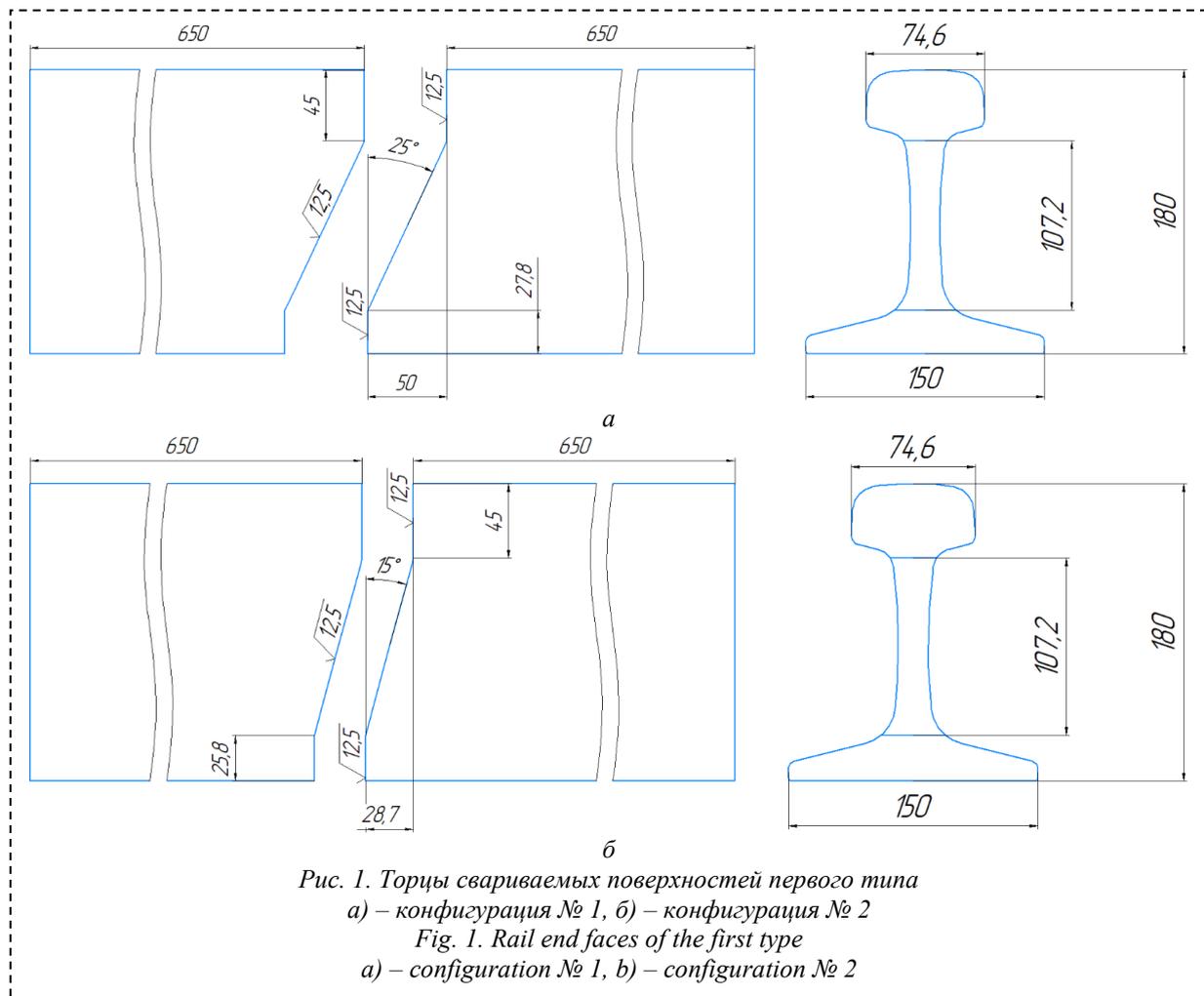
Исходя из представленных данных, изменение геометрии торцов свариваемых рельсов можно рассматривать в научном сообществе как перспективное направление повышения качества соединения. В то же время при использовании электроконтактной (или индукционной) сварки рельсов со скошенными под углом торцами возрастает риск возникновения дефектов по прямолинейности, устранение которых затруднено из-за ограниченных возможностей горячей правки. Таким образом, исследователи ограничены в поисковых работах по влиянию длины шва на качество сварного соединения только термитной

сваркой, которая не предусматривает операцию осадки в конце сварки и позволяет получать качественное и ровное соединение.

Целью данной работы является разработка нестандартного геометрического профиля торцов свариваемых рельсов, обеспечивающих после сварки пульсирующим оплавлением требуемую прямолинейность, а также высокую прочность и пластичность сварного стыка без необходимости проведения дополнительной термической обработки, за счет формирования благоприятной эпюры распределения остаточных напряжений и механических свойств, снижающих воздействие от колес подвижного состава при эксплуатации.

Методы (Methods)

Для проведения серии испытаний по сварке рельсов с измененной геометрией торцов от одного рельса типа Р65 стали марки 76ХФ категории ДТ350, изготовленного в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685-2022, было отобрано и испытано 12 образцов. Для исследования распределения напряжений в зоне сварного шва, а также оценки влияния приложенной нагрузки на прочностные и пластические свойства торцы рельсовых проб, подготовленных под сварку, подвергли механической обработке для формирования



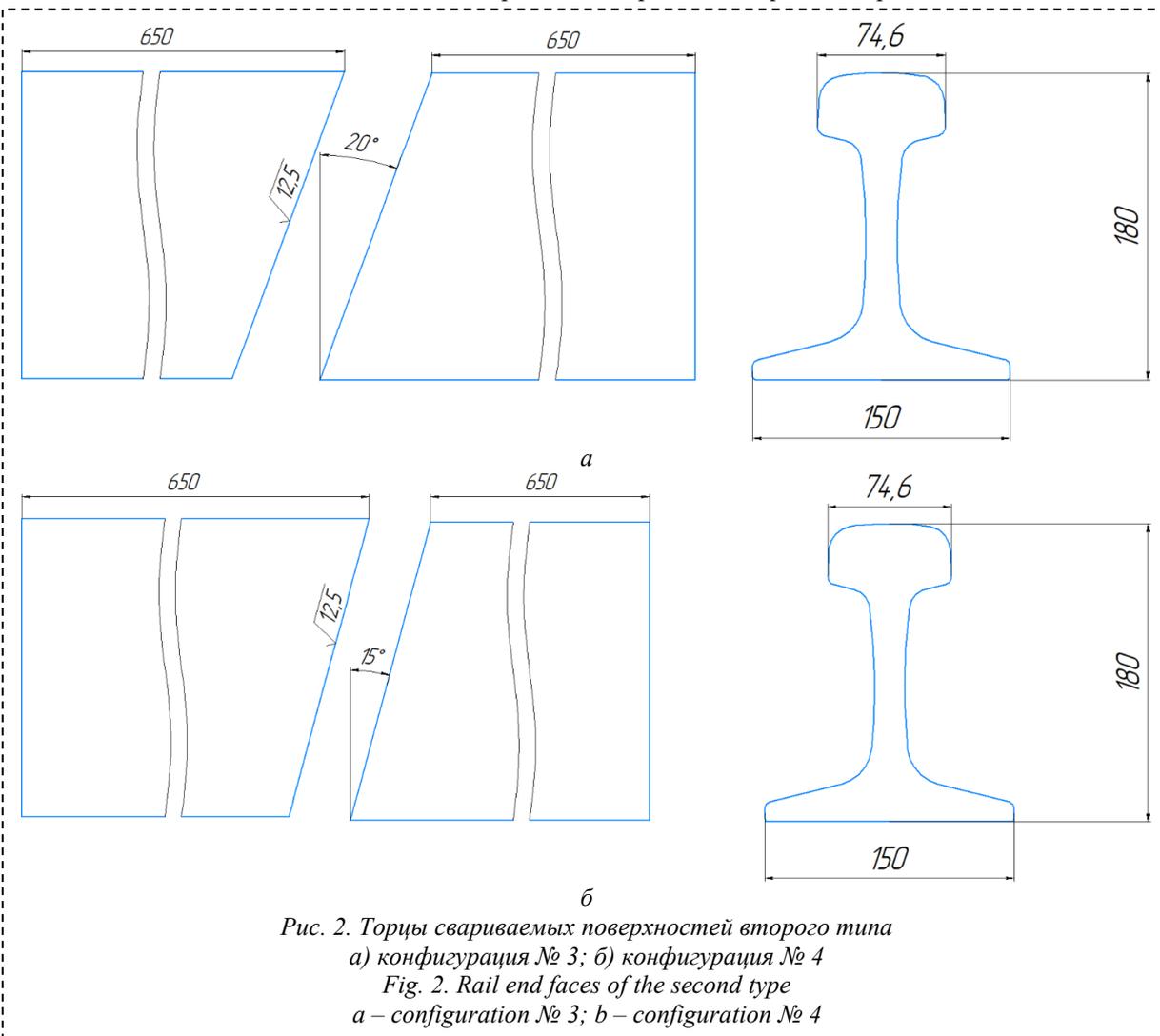
опытных конфигураций, приведенных на Рис. 1-3. В основе представленных форм лежат результаты ранее выполненной работы [15]. Всего таким образом было исследовано три типа стыков, по каждому из которых изготовили два варианта конфигурации сварного соединения.

Конфигурации № 1 и № 2 первого типа представлены на Рис. 1-а и 1-б соответственно. В обоих случаях головка и подошва рельсовых проб расположены перпендикулярно продольной оси рельса, а шейка срезана с отклонением в 25° и 15° от горизонтальной оси. Выбор такой конфигурации, помимо ориентации большей доли сварного шва под углом к направлению эксплуатационной нагрузки, обеспечивает соответствие требуемой прямолинейности стыка после осадки, достигаемой поверхностями в зоне головки и подошвы рельса под углом 90° .

Сварное соединение первого типа ранее [15] показало удовлетворительные результаты при статическом нагружении (разрушение произошло при нагрузке 2372 кН и стреле прогиба 31,5 мм), в связи с этим было принято решение повторить эксперимент для оценки механических свойств металла и контроля

протяженности зон термического влияния в области сварного шва. Уменьшение угла наклона шейки с 25° до 15° в конфигурации № 2 первого типа способствует повышению эффективности удаления графа и снижению трудоемкости механической обработки.

Торцы второго типа, представленные на Рис. 2-а и 2-б, выполнены без опорных фрагментов под углом 90° в головке и подошве, как это было предусмотрено у первого типа торцов. При проектировании данных форм использовали одну секущую плоскость, расположенную под углом 20° и 15° в горизонтальной оси. Допустимо производить подготовку таких торцов на стационарной или путевой пиле за одну операцию. Это повышает вероятность внедрения данного метода в технологическую карту по подготовке рельсов к сварке. Тем не менее, при электроконтактной сварке недостаточное усилие фиксирующего оборудования внутри машины может привести к смещению рельсов во время осадки и возникновению недопустимой кривизны, которую будет невозможно устранить горячей правкой. В рамках проводимых исследований



конфигурацию № 3 испытывали на статический трехточечный изгиб, конфигурацию № 4 использовали для оценки остаточных напряжений в головке рельса, определенных тензометрическим методом.

В отличие от торцов первого и второго типа, в которых свариваемые поверхности имели отклонение от горизонтальной плоскости, в третьем типе конфигураций № 5 и № 6 (Рис. 3-а и 3-б) линия раздела проходит под углом 24° и 29° относительно вертикальной оси. При этом перья подшвы на торцах остаются перпендикулярными и выполняют функцию

ограничителей, предотвращая нарушение симметрии при передаче усилия в ходе осадки. Конфигурацию № 5 отобрали для определения остаточных напряжений тензометрическим методом, на конфигурации № 6 оценивали на статический трехточечный изгиб.

Сварку проб длиной 650 мм производили на машине контактной стыковой сварки МСР-63.01А в режиме пульсирующего оплавления (Таблица 1).

Испытания опытных сварных стыков на статический трехточечный изгиб проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 34665-2020,

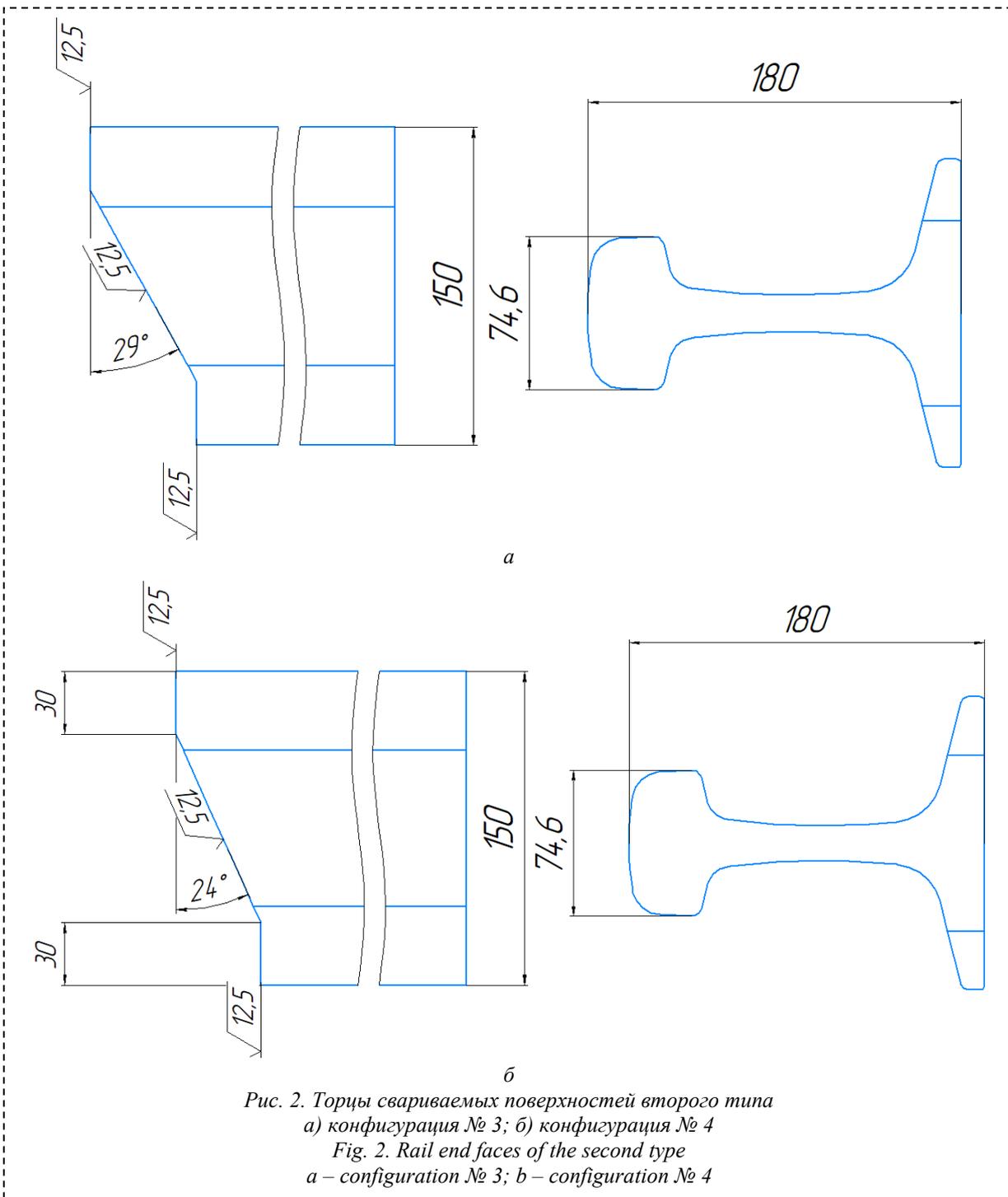


Рис. 2. Торцы свариваемых поверхностей второго типа

а) конфигурация № 3; б) конфигурация № 4

Fig. 2. Rail end faces of the second type

a – configuration № 3; b – configuration № 4

Таблица 1. Режим сварки
Table 1. Welding parameters

| Номер конфигурации | Параметр программы | | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------|-----------|----------|-------|---------|---------|-------|--------|--------|---------------|
| | Разведение | Выжигание | Подогрев | S, мм | V, мм/с | Осадка | S, мм | V мм/с | Si, мм | Проковка, сек |
| 1 (Рис. 1 а) | Вкл | Выкл | Выкл | 0,5 | 1 | По пути | 17 | 10 | 10 | 2 |
| 2 (Рис. 1 б) | | | | | | | | | | |
| 3 (Рис. 2 а) | | | | | | | | | | |
| 4 (Рис. 3 б) | | | | | | | | | | |
| 5 (Рис. 3 а) | | | | | | | | | | |
| 6 (Рис. 2 б) | | | | | | | | | | |

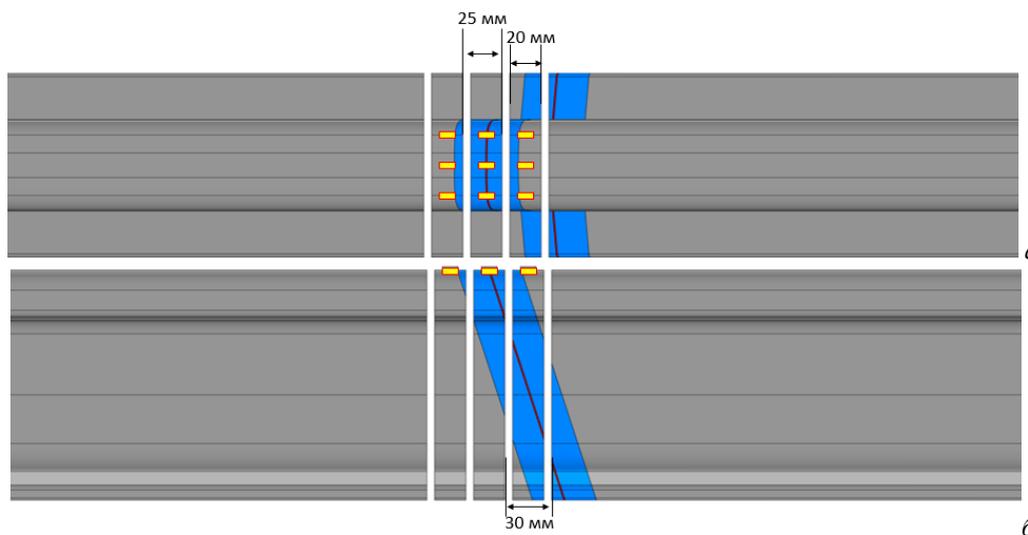


Рис. 4. Схема монтажа тензорезисторов для определения остаточных напряжений на поверхности сварной пробы конфигурации № 4

a – вид сверху; *б* – вид сбоку

Fig. 4. Illustration of strain gauge attachment for determining residual stresses on the surface of weld specimen configuration № 4

a – top view; *b* – side view

без термической обработки на прессе ПИРС-400М. Нагрузку до разрушения прикладывали на подошву. Пуансон позиционировали по месту сварного шва.

Для определения механических свойств стыка конфигурации № 1 при испытании на растяжение вырезали и изготовили по ГОСТ 1497 цилиндрический образец типа III № 6 с начальным диаметром 6 мм и расчетной длиной рабочей части 30 мм из центра сварного шва. Испытания на растяжение проводили на машине Zwick/Z 250.

Измерения микротвердости проводили на микротвердомере Qness Q10A+ по Виккерсу (HV). Устанавливали нагрузку на индентор 300 граммов, время выдержки составляло 15 секунд. Контроль твердости в зоне термического влияния конфигураций № 4 и № 6 выполняли на фрагментах, полученных после испытаний на остаточные напряжения. Микротвердость

конфигурации № 1 оценивали на продольном макротемплете после вырезки противоположной выкружки для образца на растяжение. Шлифы для оценки микроструктуры и микротвердости конфигураций № 4 и № 6 отбирали из продольных фрагментов макротемплетов (после исследования остаточных напряжений и характера распространения зоны термического влияния). Шлифы отбирали таким образом, чтобы провести микроисследования, захватив поверхность катания головки, на глубину 10, 22, 75 и 180 мм. Контролируемая область на шлифах составляла 30x15 мм.

Остаточные напряжения в продольном направлении головки рельсов измеряли тензометрическим методом с применением измерительного усилителя Spider 8 и тензорезисторов марки FLA-3-11-1LJC (производство фирмы Tokyo Measuring Instruments Lab.), с принятым модулем упругости

2,07·10⁵ МПа, посредством монтажа датчиков на зачищенную поверхность, согласно схеме на Рис. 4 и 5 и фиксации напряжений до и после вырезки темплетов согласно методике ГОСТ Р 51685-2022 (Рис. 4, 5).

Результаты исследования (Results)

Механические свойства образца, определенные испытанием при растяжении, представлены в Таблице 2.

Разрушение образца произошло за пределами расчетного фрагмента и не по сварному шву. Излом возник в области термического влияния по месту образованной отпущенной структуры, не позволив определить параметр относительного удлинения.

Результаты испытаний на статический трехточечный изгиб полнопрофильных сварных проб рельсов с изменой геометрией торцов при приложении нагрузки к подошве, изложенные в работе [15] и определенные в данной работе у трех типов стыков (Рис. 1-3), представлены в Таблице 3 и на Рис. 6. Видно, что при нагружении подошвы (и растягивании головки) конфигурация № 2 торцов первого типа не соответствует требованиям таблицы 1 ГОСТ 34665-2020 по минимально допустимой стреле прогиба для термоупрочненных рельсов с

прочностью основного металла свыше 1200 Н/мм². Экспериментально установленная стрела прогиба для данной пробы составила 16,8 мм. Полученный результат ниже минимально допустимого значения на 32,8% (25 мм). При этом прочность, определенная в результате статического изгиба, составила 1893 кН, превысив минимальную границу требований ГОСТа только на 8,17% (Рис. 6г). Полученные результаты показывают, что угол наклона шейки оказывает комплексное влияние на прочность сварного соединения. Экспериментально установлено, что отклонение от стандартной формы торца может, наоборот, привести к снижению прочности.

Конфигурация № 3 торцов второго типа сочетает высокую прочность и пластичность, определенную по результатам испытаний на статический трехточечный изгиб, с высокой скоростью изготовления при использовании металлообрабатывающего оборудования на участке отделки готовой продукции рельсобалочного цеха. В данном случае высокая автоматизация работ на производственной линии снижает вероятность не получить «идеальной стыковки» и позволяет сохранять прежний темп производства рельсов благодаря отсутствию

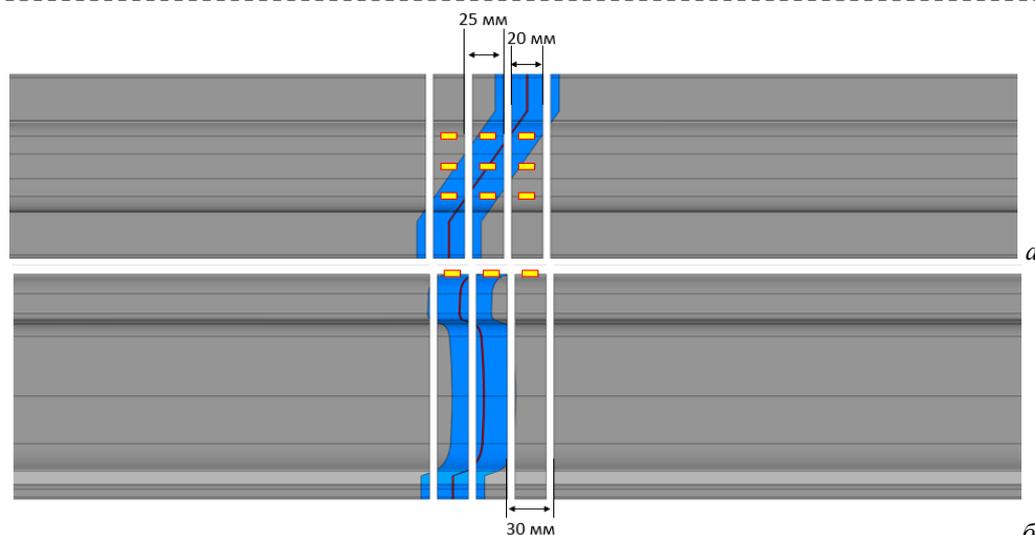


Рис. 5. Схема монтажа тензорезисторов для определения остаточных напряжений на поверхности сварной пробы конфигурации № 6
а – вид сверху; б – вид сбоку

Fig. 5. Illustration of strain gauge attachment for determining residual stresses on the surface of weld specimen configuration № 6
a – top view; b – side view

Таблица 2. Результаты определения механических свойств при растяжении

Table 2. Results of mechanical properties determination in tension

| Материал | Твердость по сечению, НВ | | | | | Прочностные свойства | | | | Ударная вязкость КСU+20 °С |
|--------------------------------|--------------------------|----------|-------|---------|------------|----------------------|----------|--------|-------------|-------------------------------|
| | Головка | | Шейка | Подошва | σ_T | σ_B | δ | ψ | | |
| | ПКГ | 10 мм | | | | | | | 10 выкружка | 22 мм |
| В ЗТВ | - | | | | | 731 | 1058 | - | 56 | - |
| Требования ГОСТ Р 51685 - 2022 | 352-405 | не менее | | 363 | 300-363 | не менее | | | | |
| | | 341 | 321 | | | 800 | 1180 | 9,0 | 25,0 | 15 |

сложных геометрических форм на торцах стоечковых рельсов. Результаты разрушающей нагрузки для данной конфигурации составили 2173 кН при стреле прогиба, равной 27,8 мм (Рис. 6д).

В проведенном эксперименте конфигурация

торцов третьего типа № 5 при испытаниях на статический трехточечный изгиб выдержала самую высокую нагрузку, разрушившись при 2235 кН. При этом стрела прогиба для данной сварной пробы составила 32,7 мм, что также является высоким результатом в рамках

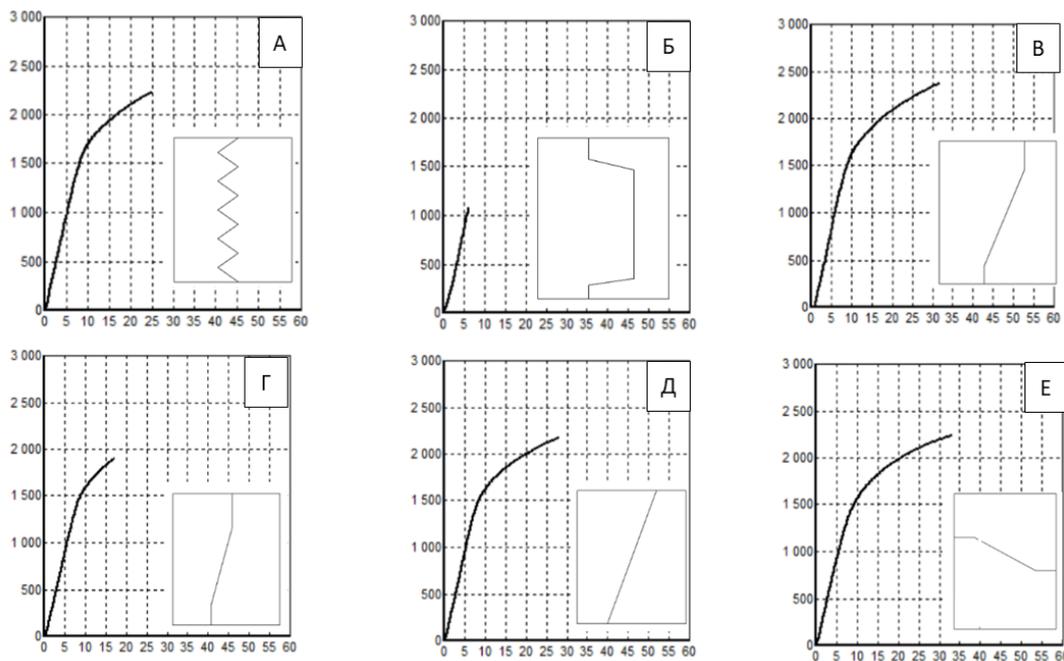


Рис. 6. Результаты испытаний на статический трехточечный изгиб по материалам работы [15] (а-в) и полученные в рамках текущего исследования (г-е). По оси X отложена стрела прогиба (мм), по оси Y нагрузка (кН)

а – торцы в виде пилы; б – паз в шейке; в – косо отраженная шейка;
г – конфигурация № 2 типа 1; д – конфигурация № 3 типа 2;
е – конфигурация № 5 типа 3

Fig. 6. Results of static three-point bending tests from reference (a-c) and obtained in the current study (d-f).

The X-axis shows the deflection (mm), and the Y-axis shows the load (kN)
a – serrated ends; b – groove in the neck; c – obliquely deflected neck;
d – configuration № 2 type 1; e – configuration № 3 type 2;
f – configuration № 5 type 3

Таблица 3. Результаты испытаний на статический трехточечный изгиб двух экспериментов

Table 3. Results of static three-point bending tests of two experiments

| | Результаты статического трехточечного нагружения | | | | | | Стык со стандартным швом | Требования ГОСТ 34665-2020 |
|--------------------------------|--|-------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------------------|----------------------------|
| | Результаты по материалам работ [15] | | | № 2 (Рис. 6г) | № 3 (Рис. 6д) | № 5 (Рис. 6е) | | Не менее |
| | «Пила» (Рис. 6а) | «Паз в шейке» (Рис. 6б) | «Косо отраженная шейка» (Рис. 6в) | | | | | |
| Усилие, кН | 2230 | 1078 | 2372 | 1893 | 2173 | 2235 | 2340 | 1800 |
| Стрела прогиба, мм | 25 | 6 | 31,5 | 16,8 | 27,8 | 32,7 | 28,2 | 25 |
| Площадь торца, мм ² | 8498 | 8341 | 8791 | 8552 | 8956 | 9321 | 8260 | Не нормируется |

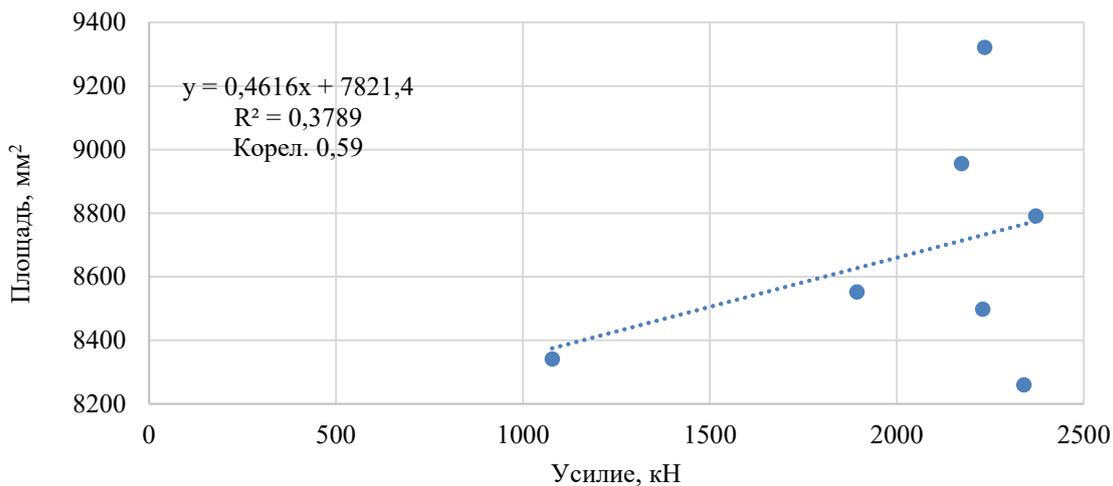


Рис. 7. График зависимости площади торцов от прочности сварного соединения
 Fig. 7. Graph showing the relationship between end-face area and welded joint strength

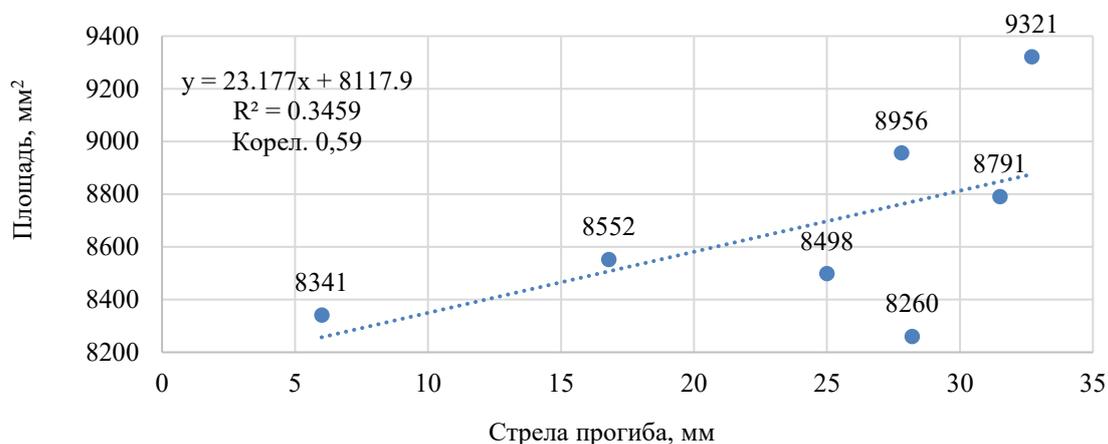


Рис. 8. График зависимости площади торцов от стрелы прогиба сварного соединения
 Fig. 8. Graph showing the relationship between end-face area and deflection of the welded joint

проведенных работ. Угол наклона секущей плоскости в вертикальном направлении реализуется легче, чем в горизонтальном, однако вероятность смещения рельсов в ходе осадки в вертикальном исполнении требует наличия упорных фрагментов, чтобы исключить вероятность поломки сварочной машины.

Повышение прочности обусловлено несколькими факторами:

- в опытных конфигурациях линия сплавления располагается под углом к направлению действия растягивающей и изгибающей нагрузки, приводя к снижению напряжений;

- расширение контактной зоны способствует снижению напряжений на единицу площади.

Для количественной оценки влияния площади торцов на прочность и пластичность строили точечные диаграммы между данными параметрами, в анализ включили результаты

статического изгиба до разрушения стыка под углом 90° по направлению прокатки, при этом параметры работы сварочной машины были сопоставимы с опытными стыками (Рис. 7, 8).

Анализ результатов, представленных на Рис. 7, показывает, что увеличение площади контакта свариваемых опытных торцов рельсов не приводит к однозначному изменению механических свойств. Вместе с тем, как видно из данных, приведенных на Рис. 8, наблюдается пропорциональная зависимость между площадью и пластичностью полученных соединений. Таким образом, можно сделать вывод о сложной взаимосвязи механических свойств сварных соединений рельсов и площади контакта, которая определяется как геометрией сварных стыков, так и маркой стали и режимом сварки.

На механические свойства сварных соединений рельсов оказывает влияние множества факторов, среди которых важную

роль играет зона термического влияния. Для более глубокого понимания особенностей формирования сварного шва и поведения металла в прилегающих областях необходимо провести анализ распределения теплового воздействия. Для этого измерили и описали параметры зоны термического влияния с привязкой к линии соприкосновения свариваемых торцов (Рис. 9).

Исходя из представленной информации, отклонение сварного шва от линии соприкосновения торцов в шейке рельса составило 3,8 мм. Согласно Рис. 9, средняя протяженность зоны термического влияния в головке составила 20,3 мм, 21,1 мм для подошвы и 17,9 для шейки. Зона термического влияния вдоль оси симметрии рельса плавно повторяет контур сварного шва. Наблюдаемое отклонение

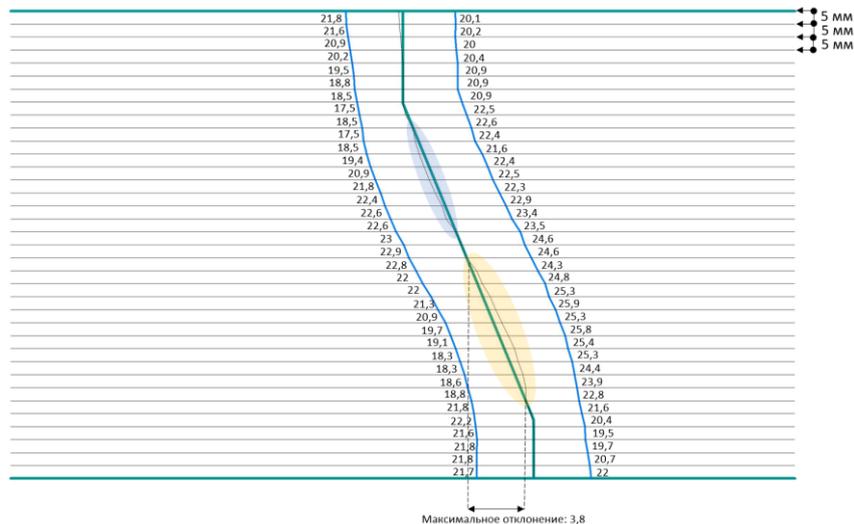


Рис. 9. Протяженность зоны термического влияния неразрушенного фрагмента сварной пробы «формы 1»

Fig. 9. Extent of the heat-affected zone in the intact fragment of welded specimen “form 1”

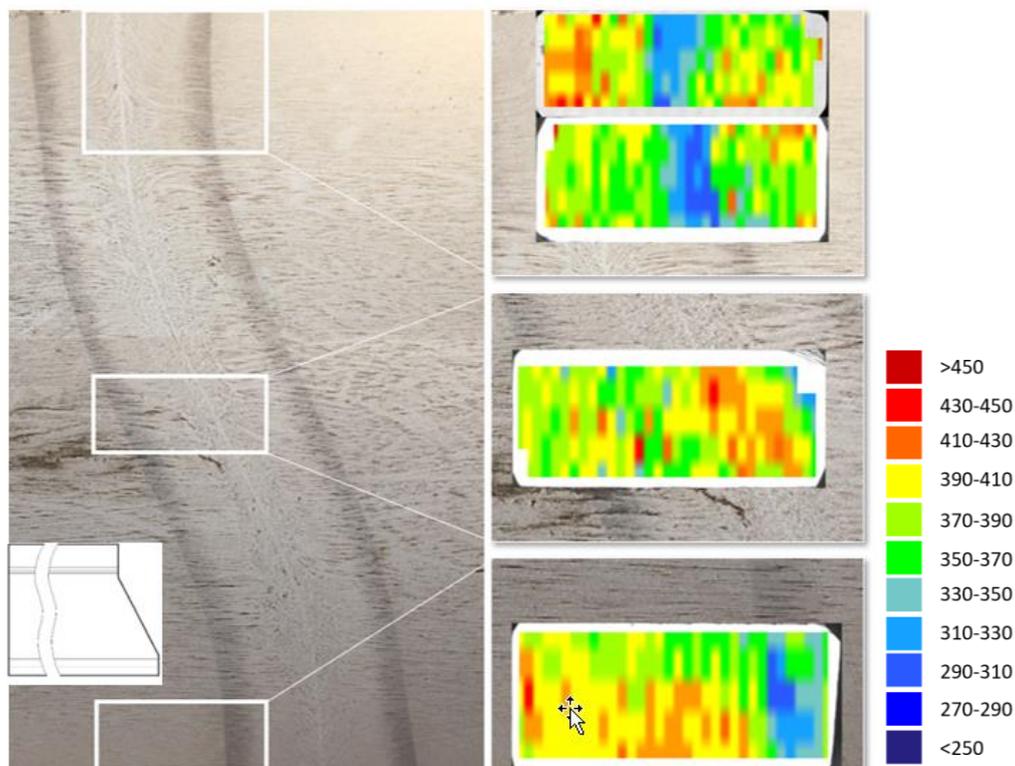


Рис. 10. Картирование микротвердости конфигурации № 1 «Шейка под углом 25°»

Fig. 10. Microhardness mapping of configuration № 1 “Neck at an angle of 25°”

сварного шва от номинального чертежа в области шейки рельса свидетельствует о локализованном интенсивном оплавлении участков с минимальным сечением металла. Опытные конфигурации торцов приводят к усиленному тепловому воздействию в перья рельса. Металл в этих «критических» участках подвергается значительным структурным

изменениям, снижая локальную прочность. Несмотря на то, что металл в зоне подошвы подвергается интенсивному перегреву, исследование микротвердости выполнено по оси симметрии рельса, где термическое воздействие и структурные изменения проявляются иначе.

Результаты картирования твердости представлены на Рис. 10-12. Падение твердости

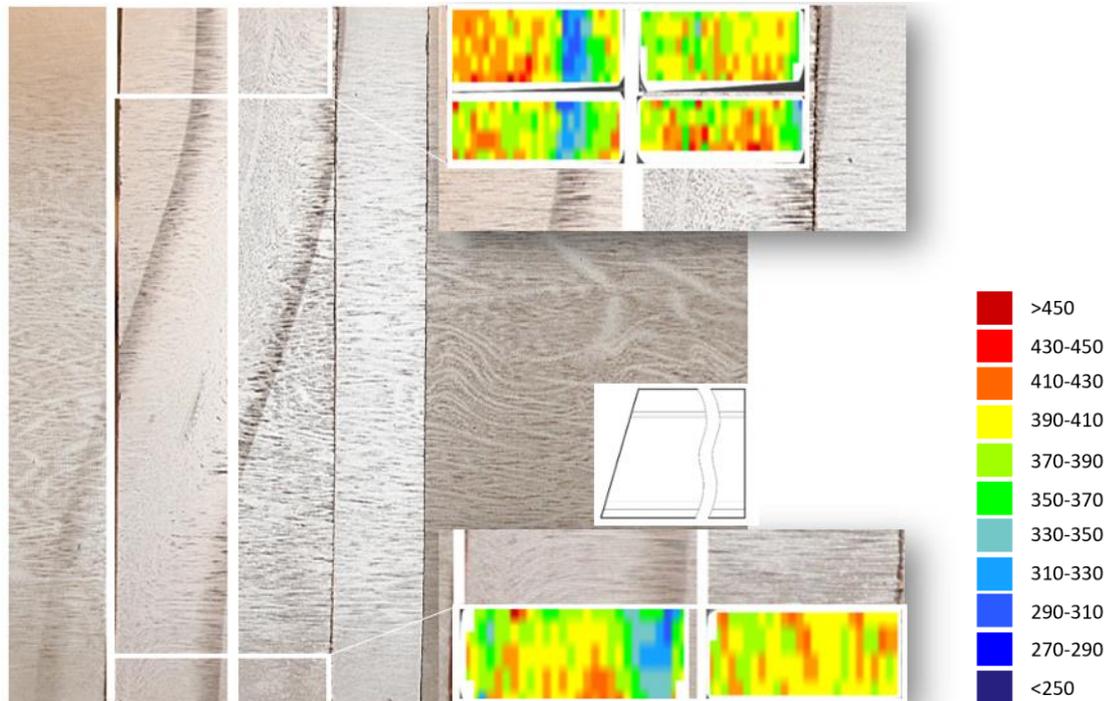


Рис. 11. Картирование микротвердости конфигурации № 4 «Наклон шейки 20°»

Fig. 11. Microhardness mapping of configuration № 4 "Neck inclination 20°"

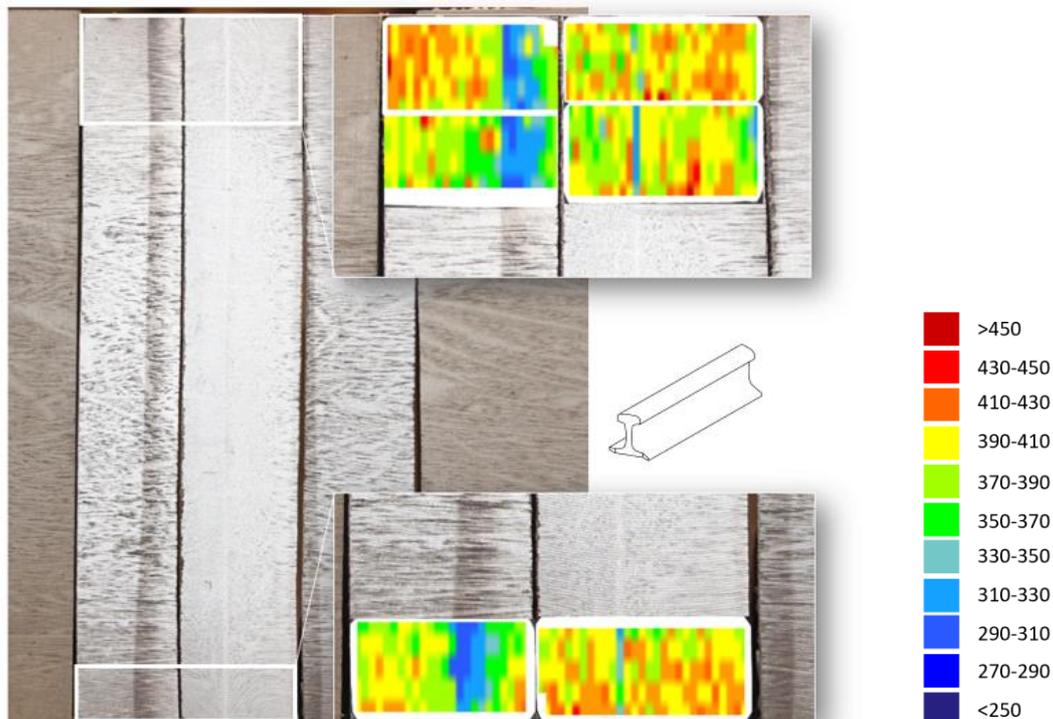


Рис. 12. Картирование микротвердости конфигурации № 6 «Угол поворота шейки 24°»

Fig. 12. Microhardness mapping of configuration № 6 "Neck rotation angle 24°"

менее 250 НВ зафиксировано вдоль темного контура в зоне термического влияния. Повышенная твердость в области сварного шва находится в диапазоне 430-450 НВ с отдельными точечными участками до 460 НВ.

Результаты измерений микротвердости в исследуемых образцах, вырезанных и изготовленных от сварных стыков с фигурной геометрией, не отличаются от распределения, наблюдаемого в соединениях с классическими торцами без применения термической обработки.

Эпюра остаточных напряжений формируется в сварном стыке в результате взаимодействия нескольких факторов. Совместно с неравномерными нагревом и охлаждением профиля сложного сечения на напряженное состояние оказывают влияние стадии осадки и снятия грата. В результате воздействия

перечисленных выше условий могут формироваться как растягивающие, так и сжимающие остаточные напряжения. Таким образом, в комплексном подходе к пониманию поведения сварного соединения необходимо учитывать итоговую эпюру напряжений. Результаты измерения остаточных напряжений в головке конфигурации № 4 и конфигурации № 6 тензометрическим методом представлены на Рис. 13.

Исходя из представленных результатов, по ходу движения гратоснимателя разница в результатах измерения остаточных напряжений уменьшается. При выполнении операции по удалению выдавленного металла ножи «утягивают» металл в продольном направлении, оказывая влияние на распределение остаточных напряжений, формирующихся при выдавливании

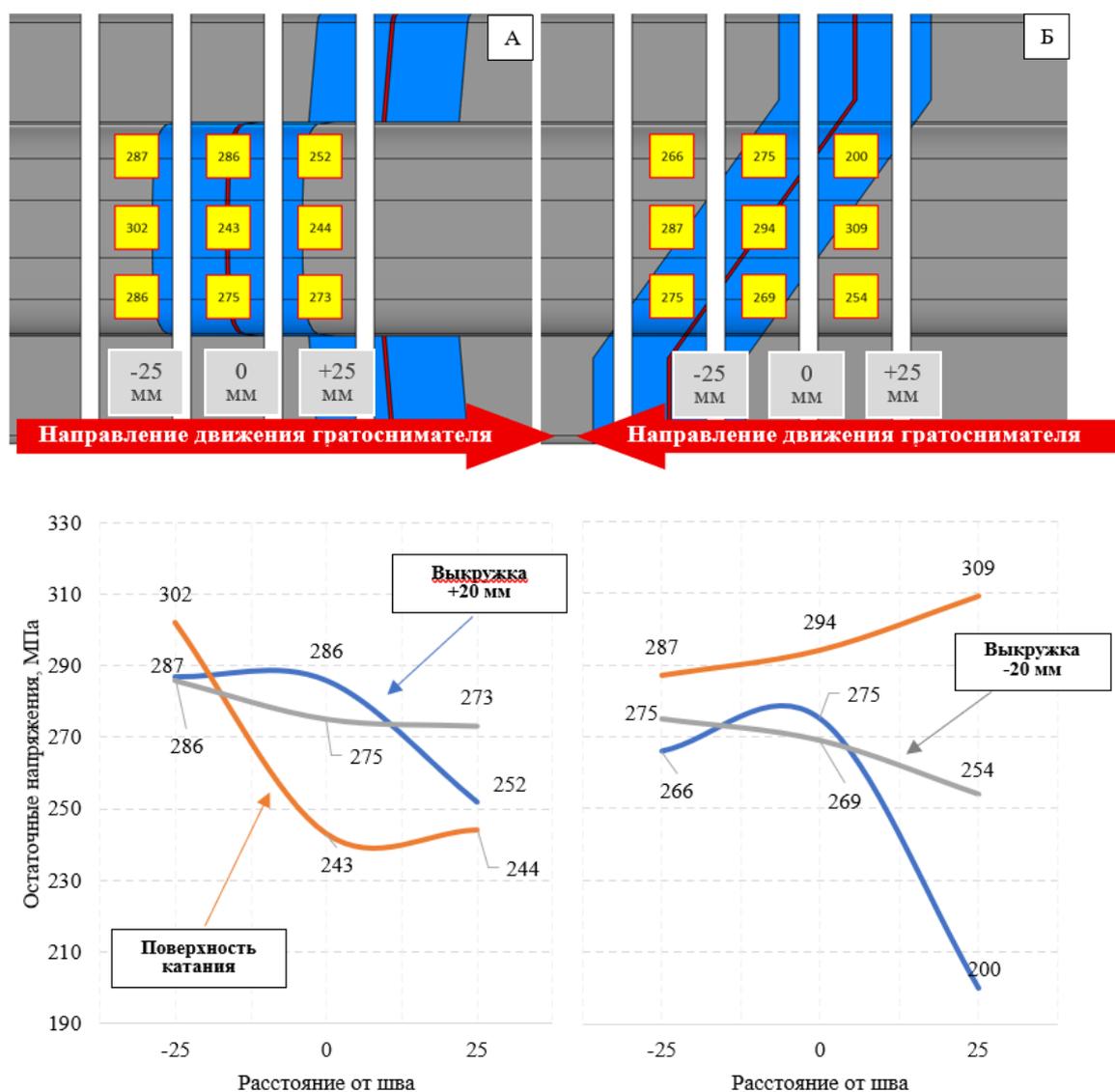


Рис 13. Результаты измерения остаточных напряжений

a – конфигурация № 4; б – конфигурация № 6

Fig. 13. Results of residual stress measurements

a – configuration № 4; b – configuration № 6

и кристаллизации металла вдоль направления прокатки профиля рельсов. В ходе подготовки поверхности к наклейке тензометрических датчиков центральная часть сварной пробы дополнительно шлифуется абразивным диском и часть волокон металла со сложными напряжениями удаляется, требуя дополнительного внимания при оценке полученных результатов. Полученные данные о растягивающих напряжениях в продольном направлении свидетельствуют о большом влиянии гратоснимателя на поверхностные напряжения.

Обсуждение (Discussion)

Протяженность линии сплавления оказывает влияние на прочность сварного соединения. В рассмотренных случаях обеспечено изменение напряженного состояния в результате распределения нагрузки по нормали и касательной. Влияние формы шва распространяется как на статические, так и на циклические испытания [12]. Длинный сварной шов распределяет прилагаемую нагрузку равномернее, однако чрезмерное увеличение протяженности шва приводит к формированию участков повышенных напряжений или перегрева, что в условиях эксплуатации может инициировать развитие трещин.

Выводы (Conclusion)

1. Экспериментально подтверждено, что геометрия торцов оказывает существенное влияние на прочность, пластичность и остаточные напряжения сварных соединений. Увеличение длины линии сплавления при косых стыках способствует перераспределению эксплуатационных напряжений и повышению несущей способности, однако чрезмерное удлинение линии приводит к локальному перегреву и формированию зон концентрированных напряжений.

2. Сравнительный анализ показал различное сочетание прочности, пластичности и у исследованных конфигураций. Конфигурация № 1 («косая шейка») обеспечила высокую прочность 2372 кН и стрелу прогиба 31,5 мм, но отличилась повышенной трудоемкостью изготовления. Конфигурация № 5 продемонстрировала нагрузку разрушения 2235 кН и стрелу прогиба 32,7 мм, однако она не рекомендована для электроконтактной сварки из-за смещения торцов при осадке. Наиболее рациональной признана конфигурация № 3 среза под углом 20°, обеспечившая баланс прочностных характеристик, пластичности и производственной эффективности.

3. Исследованные соединения требуют большей мощности сварочного агрегата по сравнению с классическим перпендикулярным стыком, что связано с большой площадью контакта. Данный факт повышает нагрузку на

парк рельсосварочных машин и должен учитываться при планировании производственного цикла. Качество соединения определяется не только формой торцов, но и точностью их механической обработки, режимами сварки и состоянием оборудования. Возможным решением повышенных энергозатрат при первом этапе оплавления исследованных в работе форм является нанесение микронеровностей на торцы рельсов.

4. Установлено, что удаление грата оказывает измеримое влияние на распределение продольных остаточных напряжений. На начальном этапе движения подвижной колонны фиксируется более выраженное расхождение значений, а на завершающей стадии различия уменьшаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коссов В. С., Краснов О. Г., Акашев М. Г. Влияние смятия в зоне сварных стыков на силовое воздействие подвижного состава на путь // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2020. Т. 79. № 1. С. 9–16.
2. Urassa P., Habte H. S., Mohammedseid A. Crack influence and fatigue life assessment in rail profiles: a numerical study // *Frontiers in Built Environment*. 2023. Vol. 9. P. 1304557. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1304557.
3. Fischer S., Harangozó D., Németh D. et al. Investigation of heat-affected zones of thermite rail weldings // *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 21. № 2. Pp. 155–176. DOI: 10.22190/FUME221217008F.
4. Liu Y., Lewis R., Wexler D., Yan J. Investigation on material characteristics and fatigue crack growth behavior of thermite welded rail joints // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 277. Art. 122323. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122323.
5. Хлыст С. В., Кузмиченко В. М., Резанов В. А. [и др.] Перспективная технология производства рельсов для высокоскоростного и тяжеловесного движения // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2013. № 6. С. 14–20.
6. Хлыст С. В., Кузмиченко В. М., Хлыст И. В., Гонтарь А. А. и др. Опыт проведения дифференцированной термообработки рельсов воздушным способом по технологии «ТЭК-ДТ» на промышленной установке ТЭК-ДТО-20-13,6 // *Инженерные решения*. 2013. № 1. С. 20–22.
7. Николин А. И., Гудков А. В., Федин В. М. [и др.] Перспективы развития парка путевых рельсосварочных машин // Вестник ВНИИЖТ. 2005. № 6. С. 5.
8. Вишняков Н., Щекатуровене Д. Проблемы выполненных термитной сваркой стыков железнодорожных рельсов // *Прогрессивные*

технологии и системы машиностроения. 2005. № 2(31). С. 44–48.

9. Сидоров Э. С. Совершенствование производственного процесса термитной сварки рельсов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2022. № 1(60). С. 76–85.

10. Шур Е. А., Федин В. М., Борц А. И., Ронжина Ю. В., Фимкин А. И. Пути устранения повышенной повреждаемости рельсов в зоне сварных стыков // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). 2019. № 4. С. 210–217.

11. Орлов С. Е. Аллюминотермитная сварка рельсов на отечественных железных дорогах // Путь и путевое хозяйство. 2016. № 10. С. 26–28.

12. Rosa J., Santos J. R., Macedo M. K., Reguly M. Aluminothermic angle welding //

Proceedings of the 9th International Heavy Haul Conference. 2009. Pp. 163–170.

13. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas-pressure weld interface: joining phenomena of gas-pressure welding // Welding International. 2014. Т. 28. № 7. С. 510–520.

14. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. 2013. № 105. С. 84–92.

15. Чумачков И. И., Коновалов С. В., Мартынов М. А. Исследование влияния формы стыков на прочность сварного соединения рельсов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 6(166). С. 14–27. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-14-27.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Чумачков Илья Игоревич, аспирант кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42.), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4721-6821>, e-mail: I.I.Chumachkov@yandex.ru

Коновалов Сергей Валерьевич, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет (654007, Россия, г. Новокузнецк, Центральный р-н, ул. Кирова, зд. 42.), д.т.н., профессор кафедры механики и машиностроения, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>, e-mail: konovalov@sibsiu.ru

Заявленный вклад авторов:

Чумачков Илья Игоревич – постановка исследовательской задачи, обзор соответствующей литературы, проведение эксперимента, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, написание текста, выводы.

Коновалов Сергей Валерьевич – научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

INFLUENCE OF RAIL END GEOMETRY ON THE QUALITY CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS WITHOUT HEAT TREATMENT

Ilya I. Chumachkov*, Sergey V. Konovalov

Siberian State Industrial University

* for correspondence: I.I.Chumachkov@yandex.ru



Article info

Received:

Abstract.

The most vulnerable areas for the formation and development of defects in welded rails are their joints. In the welding zone, a temperature gradient causes regions of reduced hardness to appear. Cracks and spallings develop in these areas, which can subsequently lead to the integrity loss of the welded string. Modifying the end-face geometry of the rails prior to welding allows

27 October 2025

Accepted for publication:
15 January 2026

Accepted:
12 February 2026

Published:
19 March 2026

Keywords: Flash-butt welding, railway rails, welded butt joint, profile, three-point bending, microstructure, mechanical properties, residual stresses.

for the formation of a weld of controlled shape, redistribution of stresses in the joint, and an increase in its strength. Changing the inclination angle of the end faces along the rolling axis helps to reduce the dynamic impact during rail service.

The purpose of this work is to continue the research on the influence of the end-face geometry of R65-type rails of DT350 grade on the mechanical properties and residual stresses of welded joints without heat treatment. Six experimental configurations obtained by flash-butt welding with pulsation on an MSR-63.01A machine using 650 mm long samples with different end-face shapes were considered.

It was shown that altering the inclination angle of the rail ends leads to stress redistribution in the joint zone and changes the residual stress profile. Welding rails with end faces inclined at 20° provides optimal mechanical properties: the fracture load reached 2173 kN at a deflection arrow of 27.8 mm. Changing the inclination angle from horizontal to vertical increases strength and ductility (up to 2235 kN and 32.7 mm, respectively), but leads to joint geometry distortion and makes subsequent hot straightening impossible.

For citation: Chumachkov I.I., Konovalov S.V. Influence of rail end geometry on the quality characteristics of welded joints without heat treatment. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 1(173):26-41. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-1-26-41, EDN: XQWPEF

REFERENCES

- Kossov V.S., Krasnov O.G., Akashev M.G. Influence of crushing in the zone of welded rail joints on the dynamic forces transmitted to the track. *Vestnik Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Zheleznodorozhnogo Transporta (Vestnik VNIIZhT)*. 2020; 79(1):9–16 (In Russ).
- Urassa P., Habte H.S., Mohammedseid A. Crack influence and fatigue life assessment in rail profiles: a numerical study. *Frontiers in Built Environment*. 2023; 9:1304557. DOI: 10.3389/fbuil.2023.1304557.
- Fischer S., Harangozó D., Németh D. et al. Investigation of heat-affected zones of thermite rail weldings. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. 2023; 21(2):155–176. DOI: 10.22190/FUME221217008F.
- Liu Y., Lewis R., Wexler D., Yan J. Investigation on material characteristics and fatigue crack growth behavior of thermite welded rail joints. *Construction and Building Materials*. 2021; 277:122323. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122323.
- Khlyst S.V., Kuzmichenko V.M., Rezanov V.A., [et al.] Prospective technology for manufacturing rails for high-speed and heavy-haul traffic. *Vestnik Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Zheleznodorozhnogo Transporta*. 2013; 6:14–20 (In Russ).
- Khlyst S.V., Kuzmichenko V.M., Khlyst I.V., Gontar A.A. [et al.] Experience with differential air heat treatment of rails by the “TEK-DT” technology on an industrial unit TEK-DTO-20-13.6. *Inzhenernye Resheniya*. 2013; 1:20–22 (In Russ).
- Nikolin A.I., Gudkov A.V., Fedin V.M. [et al.] Prospects for the development of track flash-butt rail welding machines. *Vestnik VNIIZhT*. 2005; 6:5 (In Russ).
- Vishnyakov N., Shchekaturavene D. Problems of rail joints welded by the aluminothermic process. *Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering*. 2005; 2(31):44–48 (In Russ).
- Sidorov E.S. Improvement of the production process for aluminothermic rail welding. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putei Soobshcheniya*. 2022; 1(60):76–85 (In Russ).
- Shur E.A., Fedin V.M., Borts A.I., Ronzhina Yu.V., Fimkin A.I. Ways to reduce increased rail damage in the zone of welded joints. *Vestnik Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Zheleznodorozhnogo Transporta (Vestnik VNIIZhT)*. 2019; 4:210–217 (In Russ).
- Orlov S.E. Aluminothermic welding of rails on Russian railways. *Put' i Putevoe Khozyaystvo*. 2016; 10:26–28 (In Russ).
- Rosa J., Santos J.R., Macedo M.K., Reguly M. Aluminothermic angle welding. *Proceedings of the 9th International Heavy Haul Conference*. 2009. Pp. 163–170.
- Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas-pressure weld interface: joining phenomena of gas-pressure welding. *Welding International*. 2014; 28(7):510–520.
- Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2013; 105:84–92.
- Chumachkov I.I., Konovalov S.V., Martynov M.A. Study of the influence of joint geometry on the strength of welded rail joints. *Vestnik Kuzbasskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta (KuzSTU Bulletin)*. 2024; 6(166):14–27. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-6-14-27 (In Russ).

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Ilya I. Chumachkov, postgraduate student, Department of Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University (654007, Russia, Novokuznetsk, Central District, Kirova St., 42), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4721-6821>, e-mail: I.I.Chumachkov@yandex.ru

Sergey V. Konovalov, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University (654007, Russia, Novokuznetsk, Central District, Kirova St., 42), Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanics and Mechanical Engineering, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>, e-mail: konovalov@sibsiu.ru

Contribution of the authors:

Ilya I. Chumachkov – formulation of the research problem, review of relevant literature, experiment execution, data collection and analysis, review of relevant literature, writing of the manuscript, conclusions.

Sergey V. Konovalov – research management, review of relevant literature, conceptualization of the study, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

