

# ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ (Обзор)

Р. С. ГУБАТЮК

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

При строительстве высокоскоростных бесстыковых железнодорожных магистралей массово используют высокопрочные рельсы, которые свариваются различными способами. С появлением высокопрочных рельсов с высоким содержанием углерода особую актуальность приобрела необходимость введения операции термической обработки сварных стыков в цикл изготовления рельсовой плети. Целью представленного обзора является анализ проблем и прогноз перспектив современных технологий термической обработки сварных стыков высокопрочных рельсов. Рассмотрены различные способы термической обработки, применяемые в промышленности. Проанализированы различные схемы нагрева и охлаждения сварного шва рельсов и их влияние на формирование микроструктуры и механических свойств металла соединения. Обзор литературных данных показал, что при проведении термической обработки сварных стыков высокопрочных рельсов наиболее востребована технология нагрева токами высокой частоты с последующей закалкой головки. Библиогр. 31, рис. 6.

*Ключевые слова:* бесстыковой рельсовый путь, высокопрочные рельсы, сварные стыки, термическая обработка, твердость, микроструктура, токи высокой частоты, дефекты

Мировой опыт показывает, что перспективное развитие железных дорог требует создания скоростных магистралей. Решение этой задачи выдвигает новые требования к железнодорожному пути и к основному его элементу — рельсам и их бесстыковому соединению на всем протяжении пути.

В последнее десятилетие в мире отмечается тенденция увеличения интенсивности, скорости движения и грузонапряженности на железных дорогах, что вызывает необходимость повышения надежности и эксплуатационной стойкости рельсов и обуславливает высокий уровень требований к ним по твердости, контактно-усталостной прочности, сопротивлению образованию контактно-усталостных дефектов и хрупкому разрушению [1].

С увеличением скорости движения и увеличением массы перевозимых грузов растет динамическое воздействие как на колесную пару, так и на железнодорожный путь. Одним из основных недостатков звеньев пути является наличие стыка. Рельсовый стык представляет собой место, в котором происходит «разрыв» рельсовой нити, что, несмотря на стыковые накладки, уменьшает жесткость и увеличивает просадки. Это приводит к тому, что при движении подвижного состава через стык происходит удар колеса о головку принимающего конца рельса. Толчки и удары в стыках приводят к интенсивному износу как ходовых частей подвижного состава, так и самих рельсов. В результате ударов колеса о набегающий рельс происходят смятие и сколы головки рельсов в зоне

стыка на расстоянии 60...80 мм от стыкового зазора, изломы рельсов по болтовым отверстиям, изломы накладок и стыковых болтов [2].

В связи с этим в мире существует тенденция замены стыковых болтовых соединений железнодорожных рельсов сварными стыками. Бесстыковой путь лишен недостатков стыковых соединений и имеет ряд преимуществ [3]:

- экономия металла за счет уменьшения числа стыковых креплений;
- сокращение до 30 % расходов на ремонт пути и подвижного состава;
- увеличение срока службы верхнего строения пути, а также подвижного состава за счет снижения количества ударов колес вагонов и локомотивов в месте стыка рельсовых плетей;
- снижение до 12 % основного удельного сопротивления движению поездов и в связи с этим экономия дизельного топлива и электроэнергии на тягу;
- снижение объемов работ по выправке пути, связанных с просадками в стыках;
- отсутствие изломов рельсов по болтовым отверстиям, одного из основных видов изломов в звеньевом пути;
- улучшение условий комфортабельности пассажирского проезда, снижение уровня шума;
- снижение загрязненности пути сыпучими грузами и окружающий среды пылящими грузами;
- повышение надежности работы электрических рельсовых цепей автоблокировки и т. п.

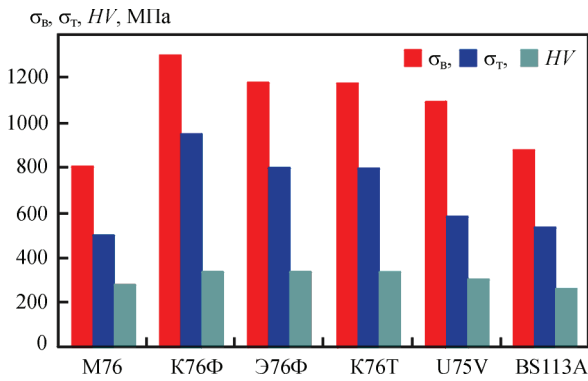


Рис. 1. Прочностные характеристики рельсов [4]

В настоящее время в мире при строительстве железных дорог широко применяются высокопрочные рельсы таких ведущих производителей, как Voestalpine (R350HT, Австрия), NipponSteel (BC-350Я, BC-350ЛДТ, Япония), CorusBritishSteel (BS113A, Великобритания), PIETC (U75V, Китай), комбинат Азовсталь (K76Ф, Украина), ОАО «Нижнетагильский металлургический комбинат» (Э76Ф, РФ), Новокузнецкий металлургический комбинат (K76Т, Россия). Высокопрочные рельсы имеют прочностные показатели металла в 1,3...1,5 раза больше, чем обычные рельсы (рис. 1, 2), а требования к пластическим свойствам в соответствии с нормативными показателями сохранились на прежнем уровне [4]. При производстве высокопрочных рельсов используют технологию производства с непрерывной разливкой стали и непрерывной прокаткой. На рис. 3 представлено распределение твердости в основном металле высокопрочных рельсов в вертикальной плоскости [5].

Высокопрочные рельсы имеют значительное содержание углерода (0,9...1,1 %) для улучшения износостойкости. При производстве таких рельсов внутри зерен аустенита остаются крупные карбиды, что снижает пластичность и ударную вязкость перлитной структуры после ускоренного охлаждения. С точки зрения структуры рельсовой стали, повышение в ней содержания углерода кардинально изменило свариваемость такой стали. На современном этапе развития оборудования технологии сварочного производства, по основному показателю свариваемости стали, высокоуглеродистая рельсовая сталь близка к высокопрочным среднелегированным сталям с содержанием углерода 0,3...0,45 %. Значение показателей углеродного эквивалента, рассчитанного по формуле [6] для этих сталей, приблизительно одинаковый —  $C_{эkv} = 0,80...1,0$  %. Таким образом, высокоуглеродистые рельсовые стали по качественному критерию свариваемости относятся к удовлетворительным, т.е. когда без специальных технологических мер и рациональных режимов сварки

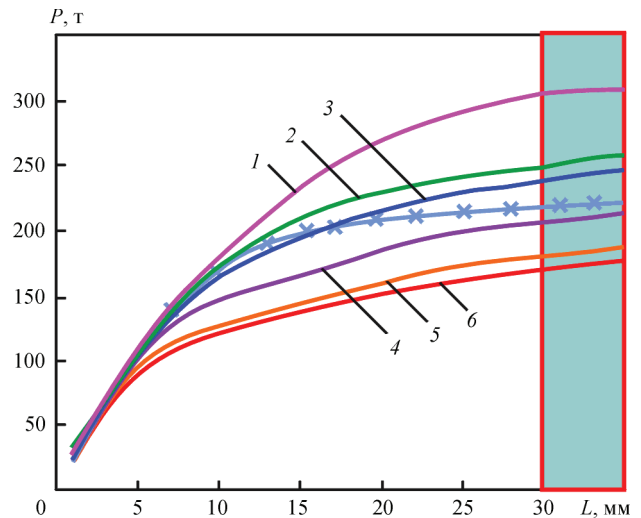


Рис. 2. Зависимость нагрузки при испытании на статический изгиб от прогиба рельса [4] 1 — НКМК Э78ХС (РФ); 2 — НКМК, НТМК Э76Ф, К76Ф (РФ, 2012); 3 — НКМК, НТМК Э76Ф, К76Ф (РФ, 2003); 4 — Азовсталь КФ (Украина); 5 — U75V (КНР); 6 — Азовсталь М76 (Украина)

невозможно обеспечить металлическую целостность соединения [7].

В настоящее время в мировой практике при строительстве бесстыкового пути рельсы сваривают следующими способами [8]:

давлением — электроконтактная сварка, газопрессовая сварка, индукционная сварка, лазерная сварка, сварка трением;

алюминотермитным;

электродуговым — сварка штучными электродами, сварка под слоем флюса, сварка в среде защитных газов, электрошлаковая сварка, сварка порошковыми проволоками и др.

Способ сварки давлением основан на разогреве концов рельсов до температуры пластического состояния и сдавливанием их с определенным усилием. Концы рельсов можно нагревать электриче-

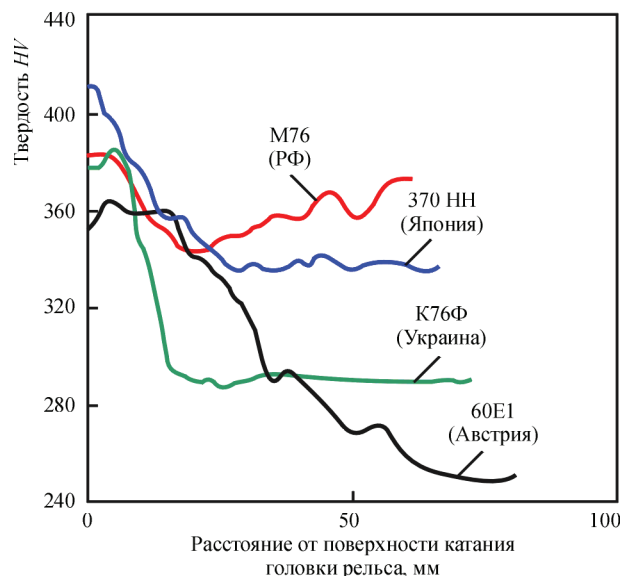


Рис. 3. Распределение твердости в основном металле высокопрочных рельсов в вертикальной плоскости [5]

ским током, газовыми горелками, токами высокой частоты, лазером, плазмой, теплом, выделяемым при трении. При сварке давлением отсутствует присадочный материал, концы рельсов свариваются между собой. При использовании сварки давлением прочность и надежность сварных стыков рельсов определяется, прежде всего, правильным выбором технологии и режимов сварки.

Алюминотермитный и электродуговой способ существенно отличаются от способов сварки давлением тем, что сварной шов шириной 15...25 мм и более состоит из присадочного материала, имеющего литую структуру [9]. Качество сварных стыков рельсов и их долговечность зависят и от свойств присадочных материалов.

Из перечисленных способов сварки рельсов наибольшее распространение получил электроконтактный способ сварки [10]. Этот способ обеспечивает высокое качество сварного соединения, высокую производительность процесса, высокую автоматизацию и механизацию процесса, наличие системы контроля параметров режима сварки.

Для всех способов сварки характерно наличие зоны термического влияния (ЗТВ). Возникающие остаточные напряжения в металле ЗТВ приводят к снижению прочностных характеристик сварного соединения. Ширина ЗТВ зависит от времени воздействия высоких температур на основной металл, массы присадочного материала, способа и параметров сварки [11].

С каждым годом увеличивается количество остродефектных сварных стыков рельсов, также увеличивается количество изломов рельсов в сварных стыках. Эти дефекты сварки наблюдаются в последние годы при использовании рельсов из электростали для строительства бесстыкового пути [3, 12].

Зона сварных стыков является слабым участком рельсового пути. Как показывает практика, количество дефектов в изъятых дефектных рельсах достигает 30 % в сварных швах при общей протяженности шва не более 2 % длины рельсовой плети. Причина этого заключается в изменении однородности микроструктуры в зонах сварного шва и ЗТВ, а также создании неблагоприятной эпюры остаточных напряжений. При сварке создаются условия для образования внутренних дефектов, являющихся концентраторами напряжений и ослабляющих участки рельса со сварным швом, а также коробление рельса в зоне сварного шва с последующим образованием при эксплуатации седловин. Большинство дефектов рельсов приходится на зону головки. Дефекты в виде поперечных трещин в головке составляют 33 %, возникают из-за недостаточной контактно-усталостной прочности металла, на-

рушений технологии сварки рельсов и внутренних дефектов. При этом дефекты, вызванные горизонтальным расслоением головки рельса из-за наличия скоплений неметаллических включений, составляют 17 %. Дефекты, образовавшиеся в результате вертикального расслоения головки из-за остатков усадочной раковины, составляют 19 %. Остальная доля дефектов приходится на выкрашивание слоя, наплавленного на поверхность катания головки, боковой износ и смятие головки рельса в сварном стыке. На рис. 4 показано расположение дефектов рельсов по поперечному сечению [6].

Основными недостатками, снижающими ресурс в эксплуатации рельсов, являются [11]:

- наличие остаточных напряжений в головке рельса, которые имеют место в результате операции холодной правки при производстве;
- создание мягких участков с пониженным сопротивлением износу и смятию в ЗТВ после сварки и локальной термической обработки сварных швов;
- заметное снижение ударной вязкости, трещиностойкости и критического размера усталостных трещин при закалке с прокатного нагрева по сравнению с закалкой с отдельного перекристаллизационного нагрева.

Известно [13], что сварное соединение рельсов имеет крупнозернистое строение и более низкие показатели механических свойств, чем основной металл. Металл зоны сварного стыка, по сравнению с металлом прокатных рельсов, отличается меньшей пластичностью, вязкостью и большей склонностью к хрупким разрушениям. В сварных стыках высокопрочных рельсов наблюдаются провалы твердости, в том числе в закаленном слое металла головки рельса. У рельсов обычной прочности разброс твердости в зоне сварки колеблется в небольших пределах  $HB\ 10...30$ , а при сварке рельсов повышенной и высокой прочности в

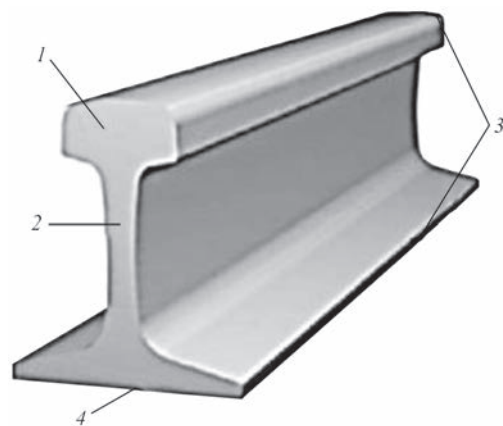


Рис. 4. Расположение дефектов рельсов по поперечному сечению [6]: 1 — в головке рельса (74 %); 2 — в шейке (7 %); 3 — другие дефекты вне стыка (16 %); 4 — в подошве рельса (3 %)

стыках наблюдается значительное снижение твердости (на *НВ* 100...150), и соответственно, износоустойчивости и предела выносливости металла в головке рельса.

В мировой практике все шире применяют дополнительную термическую обработку (ТО) рельсовых стыков, которая минимизирует последствия высокотемпературного нагрева высокопрочных рельсовых сталей в процессе сварки [14, 15]. Дополнительная ТО рельсового стыка повышает его прочностные свойства и измельчает микроструктуру сварного соединения. Применение ТО положительно сказывается на сроке службы сварного стыка рельсов, так как предел усталостной прочности выше предела прочности сварного стыка, не подвергнувшегося ТО. Хрупкая прочность и ударная вязкость металла сварных рельсов после местной ТО стыков возрастают, увеличение сопротивляемости хрупким разрушениям сварных рельсов обычной, повышенной и высокой прочности увеличивает надежность их работы в пути. Это особенно важно при массовом применении рельсов из сталей новых марок бесстыковых плетей и рельсов в районах с суровым климатом, на скоростных и высокоскоростных линиях [16].

В этой связи актуальным является вопрос определения оптимальных режимов ТО сварных стыков высокопрочных рельсов, решение этой задачи позволит повысить долговечность и надежность железнодорожных магистралей.

Наибольшую конструктивную прочность имеют рельсы с однородной структурой сорбита закалки максимальной дисперсности с твердостью *НВ* 331...388, или рельсы с однородной структурой отпущенного мартенсита или бейнита. Эксплуатационная стойкость рельсов напрямую связана с их твердостью. Такие параметры микроструктуры рельсов, как величина межпластиночного расстояния в перлите, величина перлитных колоний, наличие избыточного феррита, также оказывают большое влияние на свойства рельсов. Известно, что перлитная структура образуется при диффузионном превращении аустенита в широком интервале температур — от приблизительно 720 до 450 °С, и имеет вследствие этого различную дисперсность, оцениваемую величиной межпластиночного расстояния, которое может изменяться более чем на порядок: от примерно 1,0 до 0,05 мкм. Соответственно изменяется твердость стали и другие характеристики механических свойств [17].

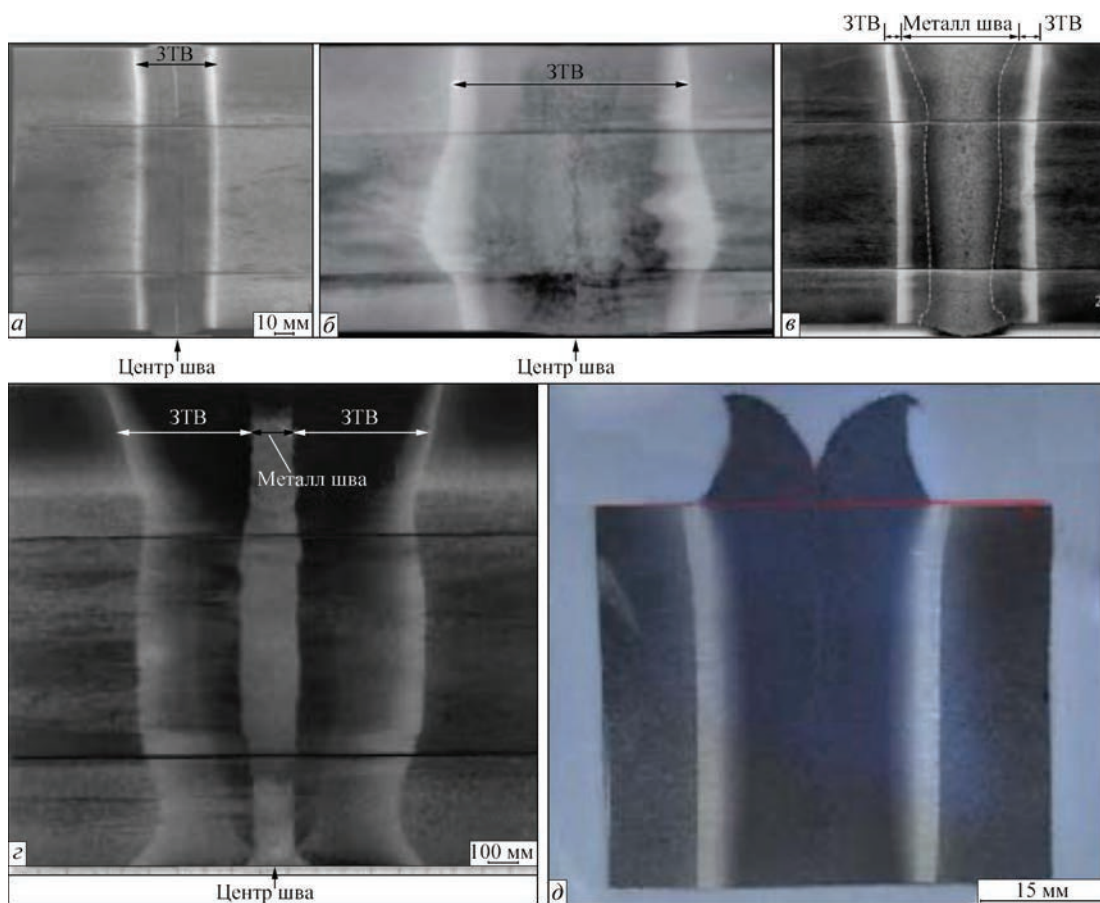


Рис. 5. Макроструктуры сварного стыка рельса, сваренного разными способами [17]: *a* — контактно-стыковая сварка оплавлением; *б* — газопрессовая сварка; *в* — алюминотермитная сварка; *г* — сварка закрытой дугой (Enclosed arc welding); *д* — линейная сварка трением

Известно (рис. 5), что контактно-стыковая сварка и дуговая сварка имеют минимальные зоны литого металла и ЗТВ. Аллюминотермитный стык имеет самую большую зону литого металла и ЗТВ, газопрессовый способ — самую большую ЗТВ рельсовой стали. При линейной сварке трением зона литого металла минимальная, а ЗТВ состоит из нескольких зон.

На рис. 6 представлены сравнительные результаты по распределению твердости в сварном стыке при сварке разными способами без термообработки стыка и с термообработкой. Видно, что аллюминотермитная и газопрессовая сварка имеют провал твердости на большей площади стыка по сравнению с другими способами [18].

В настоящее время проведено много работ по определению рациональной технологии ТО рельсовых стыков высокопрочных рельсов. В разных странах мира технологии ТО сварных соединений имеют принципиальное различие. В Германии для проведения ТО после сварки стыка выполняется нагрев экзотермическим порошком, который вливается в стальной клингер, окружающий сварной стык, и поджигается, происходит горение порошка при температуре 370...430 °С. Контролируемое охлаждение стыка происходит около 30 мин, обеспечивая полное перлитное превращение. В рекомендациях Министерства железных дорог (Индия) при контактно-стыковой сварке высокопрочных рельсов необходимо выполнять контролируемую ТО после сварки. Процесс ТО происходит в асбестовой трубе диаметром 300 мм, длиной

1 м, которая устанавливается на участок рельса со сварным швом и происходит нагрев стыка до температуры 850 °С четырьмя керосиновыми горелками с выдержкой порядка 10 мин, после чего сварной стык перемещается на закалочное устройство сжатым сухим воздухом. Специалисты австрийской компании Voestalpine Schienen GmbH рекомендуют применять после сварки высокопрочных рельсов собственного производства типа R350HT, R370CrHT, R400HT различную ТО в виде последующего нагрева стыка, выдержки ускоренного охлаждения и т. п. В Великобритании проводились работы по определению оптимальной скорости нагрева, влияния условий закалки на распределение остаточных напряжений в сварном стыке высокопрочных рельсов и поиска приемлемого времени цикла. Сварной стык нагревали с различным тепловым потоком от 75 до 120 кВт/м<sup>2</sup> до температуры 650 °С и охлаждали с различной скоростью от 2...5 °С/с. В ходе исследований было установлено, что уровень остаточных напряжений растяжения может быть уменьшен путем быстрого нагрева сварного стыка непосредственно после сварки. Результаты ускоренного охлаждения показали улучшенное распределение твердости по сравнению с естественным охлаждением на воздухе. Железнодорожным исследовательским институтом Японии была разработана технология газопрессовой сварки и ТО высокопрочных рельсов. После сварки, когда температура стыка достигает 600 °С, он повторно нагревается специальными горелками порядка 90 с до температуры 1000 °С. После это-

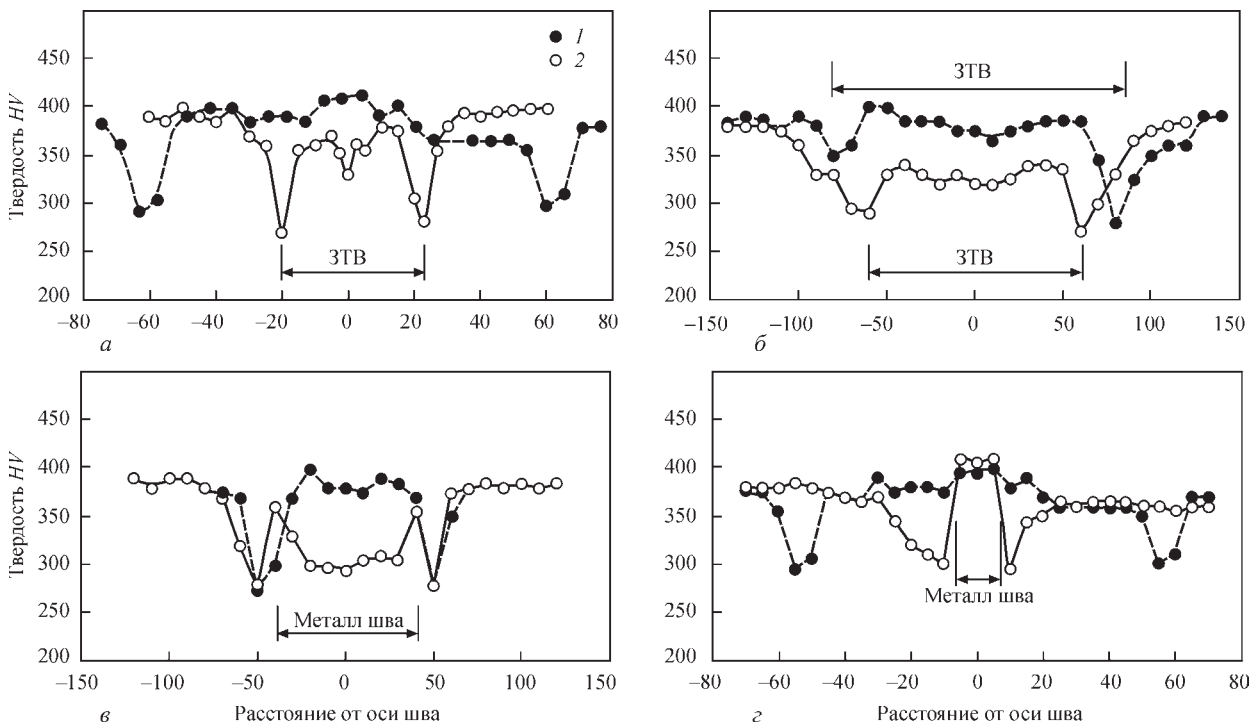


Рис. 6. Распределение твердости в зоне сварного стыка рельса, сваренного различными способами [13]: а — контактно-стыковая сварка оплавлением; б — газопрессовая сварка; в — аллюминотермитная сварка; з — сварка закрытой дугой (Enclosed arc welding); 1 — после ТО, 2 — сварной

го происходит охлаждение специальным закалочным устройством до температуры 300 °С. В США имеется опыт строительства железных дорог, используя высокопрочные рельсы японского производства гиперэвтектоидной стали марки HE-X с содержанием углерода 1,1 % длиной 146 м, которые свариваются в 440-метровые плети. В дальнейшем вся сварная плеть пропускается через сквозное индукционное устройство для ТО, чем обеспечивается равномерная твердость и однородность структуры по всей протяженности сварной плети. В университете Цинхуа (Китай) проводились исследования по влиянию ТО на сварное соединение рельсы U75Mn. ТО осуществлялась путем индукционного нагрева соединения до температуры нормализации 880 °С и температуры отпуска 600 °С. Результаты исследований показали, что при нормализации изменяется размер зерен в сварном соединении и улучшаются механические свойства металла, возрастает твердость. При температуре 600 °С показатели твердости оказались даже ниже показателей сварного соединения без ТО [19–25].

В ряде работ доказана необходимость применения дифференцированной ТО сварных стыков, заключающейся в упрочнении головки стыка с повторного перекристаллизационного индукционного нагрева всего его сечения с последующей нормализацией подошвы и шейки рельса. В итоге увеличивается твердость в головке рельса, а также возрастает усталостная и хрупкая прочность вследствие измельчения структуры металла сварного соединения. По мнению авторов, дифференциальная ТО сварных стыков рельсов устраняет зональную неоднородность металла шва [26].

По мнению специалистов Томского университета (РФ) технология с упрочнением воздушно-водяной смесью является ненадежной. Потому что в металле головки сварного стыка рельсов образуется неблагоприятная закалочная структура мартенсита, которая превышает нормативную твердость рельсовой стали, что резко снижает сопротивление рельсов усталостному и хрупкому разрушению. Такая структурная неоднородность по поверхности катания стыка приводит к выкрашиванию этих областей металла [27].

Результатом проведенных работ по ТО сварных стыков на индукционных установках типа ИТСМ-250/2,4 российского производства с частотой тока 2,4 кГц является восстановленная твердость до уровня прочности основного металла, при этом в головке рельса формируется структура сорбита закалки. Предел текучести металла и выносливости сварных рельсов не ниже прокатных. По мнению авторов данных работ для обеспечения прочности и надежной работы путей ТО обработка сварных

стыков рельсов современного производства с высоким содержанием углерода и других легирующих элементов является обязательной [13, 27].

Томской компанией «МагнитМ» разработан способ ТО сварных стыков рельсов, основанный на нагреве сварного соединения по оптимальной форме распределения температурного поля. Данный способ ТО позволяет исключить самоотпуск головки рельса после ее охлаждения. Закалку головки рельса производят путем принудительного охлаждения сжатым воздухом, которая характеризуется более равномерным и стабильным распределением твердости на поверхности катания в зоне сварного соединения, чем при закалке воздушно-водяной смесью. Для проведения ТО была разработана эффективная конструкция индуктора для нагрева установки типа УИН-100/РТ-П и использовалась различная частота тока источника индукционного нагрева 8,0.....16,0 кГц [28].

Авторами работы [29] проводились исследования эффективности различных способов ТО. Было определено, что применение односторонней схемы закалочного охлаждения, когда воздушная закалочная среда воздействует только на головку рельса, приводит к тому, что зона стыка, нагретая до температуры выше критической, при охлаждении резко уменьшает объем, что ведет к ее сжатию. Оставшаяся высокая температура в подошве приводит к пластической деформации, что способствует деформации рельса и получения прогиба на подошве. Для устранения негативного влияния напряжения в подошве рельса авторы предлагают технологию с применением дифференцированной двухсторонней схемы закалочного охлаждения. Схема проводит закалочное охлаждение головки рельса и подстуживание его подошвы для сохранения геометрии рельса и позволяет получить благоприятную эпюру сжимающих напряжений в головке и подошве и компенсирующих растягивающих напряжений в шейке. После проведения ТО микроструктура металла шва в головке рельса и подошве представлена сорбитом, в шейке — пластинчатым и зернистым сорбитом смешанной морфологии.

По мнению автора работы [30] установки типа УИН-001 имеют конструкцию с излишне широким индуктором, который в процессе ТО приводит к избыточному увеличению ЗТВ, времени нагрева и воздействию высоких температур на металл рельса. Так как профиль рельса имеет сложную форму поперечного сечения с различными объемами металла, для равномерного распределения температурного поля по сечению специалистами ИЭС им. Е. О. Патона предлагается снизить частоту тока до 2,4 кГц и применить специальную конструкцию индукторов с магнитопрода-

ми. Благодаря этому улучшается магнитная связь между индуктором и сварным стыком и происходит равномерное распределение вкладываемой мощности в нагреваемый стык рельса. Увеличивается часть мощности, передаваемой в головку и в подошву, по сравнению с шейкой, и уменьшается в перьях рельса, предотвращая их перегрев. В итоге получается равномерный нагрев всего поперечного сечения сварного стыка рельса с допустимым градиентом перепада температурного поля. В результате ТО сварных стыков позитивно изменилась микроструктура металла сварного соединения, равномерно распределилась твердость по ширине ЗТВ.

Различное современное оборудование, разработанное для процесса ТО сварных стыков рельсов, позволяет обеспечить проведение процесса ТО в виде единой технологической операции на одном индукционном оборудовании для различных марок стали и различных типоразмеров рельсов. Это обеспечивается рациональным выбором режима термообработки.

Существуют некие рекомендации при проведении ТО сварных стыков высокопрочных рельсов. При индукционном нагреве обрабатываемого соединения ниже критической точки  $A_1$  (690...730 °С) и значительной выдержке при этой температуре может произойти рекристаллизация и частичный рост размеров зерен. При такой выдержке карбиды, образованные во время сварки, могут снова раствориться в ферритной матрице. При этом медленное охлаждение вновь способствует образованию таких карбидов, что может привести к снижению эксплуатационной стойкости рельсов. Поэтому рекомендуется при индукционном нагреве рельсовой стали быстрый нагрев до максимальной температуры выше точки  $A_1$ , с минимальной выдержкой или без нее, и быстрое охлаждение до температуры 600...650 °С. В этом случае образуется сорбитообразный перлит с разрозненной сеткой феррита, при этом мелкодисперсный цементит растворяется в ферритной матрице, что увеличивает твердость сварного шва. В случае быстрого охлаждения стали, содержащей 0,71 % углерода, в температурном диапазоне  $A_1 < T < A_3$  аустенитные зерна превращаются в мартенсит и образуется закаленный стык рельса. Как известно, мартенсит имеет высокую твердость и одновременно высокую хрупкость. Медленное охлаждение  $< 10$  °С/с от температуры отжига до  $A_1$  и принудительное охлаждение сжатым воздухом до температуры 510...420 °С, может образовать бейнитную структуру, которая имеет высокую прочность и ударную вязкость, но твердость такой структуры оказывается выше нормативной твердости рельсовой стали [31].

Также можно сказать, что развитие железных дорог идет по пути строительства высокоскоростных и грузонапряженных магистралей, которые ужесточают условия эксплуатации железнодорожного полотна и требуют повышения качества как самих рельсов, так и их сварных соединений. Производители сохраняют тенденции по увеличению содержания углерода в рельсовых сталях, разрабатывают новые системы легирования рельсов и технологии ТО, что повышает их эксплуатационные свойства. Для уменьшения повреждения рельсов необходимо обеспечить высокую твердость, износостойкость, контактно-усталостную прочность металла головки и одновременно пластичность и стойкость к знакопеременным нагрузкам в шейке и подошве. Данный обзор показывает, что несмотря на большие успехи в области ТО по повышению надежности сварных соединений рельсов, существующие технологии ТО не обеспечивают достаточную стабильность служебных свойств и не позволяют в полной мере получить требуемые эксплуатационные характеристики сварных швов рельсов. Поэтому возникает необходимость проведения дальнейших исследований и изучения особенностей кинетики фазовых превращений в сварном соединении рельса в процессе нагрева и охлаждения при проведении ТО, которые помогут решить поставленную задачу. На сегодня в мире нет единого устоявшегося мнения относительно выполнения технологического процесса ТО по ряду параметров: источник нагрева, мощность, вид закалочной среды, температурно-временные показатели для сварных стыков высокопрочных рельсов, со схожими весовыми и геометрическими показателями. В полной мере нет четкого определения зоны влияния при ТО, которая в свою очередь зависит от способа выполнения сварного соединения железнодорожных рельсов. Предпочтительными являются способы выполнения сварных соединений с минимальной шириной ЗТВ, такие как контактно-стыковая сварка оплавлением рельсов и последующей ТО сварного стыка.

Широкое распространение получил способ проведения ТО сварных стыков высокопрочных рельсов с нагревом ТВЧ, который имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами. Такой способ позволяет контролировать процесс нагрева, является управляемым в части необходимого количества вкладываемой энергии, в том числе и на определенной глубине металла, обеспечивает более равномерный прогрев сварного соединения по всему сечению, сокращает время нагрева, а следовательно и воздействие высоких температур на металл сварного соединения. Следует отметить, что в литературе почти не анализируется влияние режимов индукционного нагрева и охлаждения на структуру рельсо-

вой стали, а также влияние образовавшейся структуры на эксплуатационную стойкость, а именно, охлаждение в большей степени формирует структуру металла и его свойства.

Одним из сдерживающих факторов распространения технологического процесса ТО с нагревом ТВЧ сварных стыков железнодорожных рельсов является сложный процесс определения формы и конструкции рабочего органа – индуктора, удовлетворяющего всем требованиям технологического процесса ТО. Форма и конструкция индуктора зависит от многих характеристик: геометрических (сложная форма поперечного сечения рельсов, массогабаритные показатели составных частей рельсы — головки, шейки, подошвы), электрических (рабочая частота, электромагнитные параметры системы), тепловых (скорость нагрева, время выдержки, скорость охлаждения, распространение тепловых потоков в сложной геометрии объемов металла в зоне сварного соединения и основного металла), а также места проведения ТО сварных стыков железнодорожных рельсов (рельсостроительное предприятие, полевые условия, ремонт).

В этой связи актуальным является задача создания нового комплекса оборудования для ТО, который будет отвечать современным требованиям определения оптимальных режимов ТО сварных стыков высокопрочных рельсов для повышения долговечности и надежности железнодорожных магистралей.

В заключение отметим, что существующие технологии ТО сварных стыков высокопрочных рельсов нуждаются в дальнейшем исследовании процесса, так как на современном этапе действующие технологии ТО не обеспечивают в полной мере достаточную однородность свойств сварного соединения и основного металла.

При этом необходимо проводить дальнейшие исследования по влиянию скоростей нагрева, времени выдержки и охлаждения на особенности структурообразования путем управления режимами термического цикла в диапазоне температур фазовых превращений и влияние на структурную долю фазовых составляющих в сварном соединении, которые определяют его надежность и долговечность.

Также недостаточно точно определена ширина зоны влияния при ТО сварного соединения. При исследовании процесса ТО необходимо определить такую зону, чтобы максимально повысить однородность сварного соединения с основным металлом рельса и уменьшить ее чувствительность к концентраторам напряжения.

Для решения общей задачи необходимо учитывать сложную форму поперечного сечения свар-

ного рельса и распространение тепловых потоков в металле сварного соединения и по оси рельса. Немаловажным является применение методов физического и математического моделирования для определения требуемых тепловых полей, электромагнитных параметров системы и фазовых превращений при ТО сварного соединения рельсов.

### Список литературы

1. Громов В. Е., Юрьев А. Б., Морозов К. В. и др. (2014) Сравнительный анализ структурно фазовых состояний в рельсах после объемной и дифференциальной закалки. *Сталь*, 7, 91–95.
2. Воронин Н. Н., Прохоров Н. Н., Трынкова О. Н. (2012) Резервы алюминотермитной сварки рельсов. *Мир транспорта*, 2, 76–83.
3. Жадан Г. И. (2012) Оценка мероприятий по совершенствованию бесстыкового пути с позиции ресурсосбережения. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*, 32, 263–268.
4. Кучук-Яценко С. И., Кривенко В. Г., Дидковский А. В. и др. (2012) Технология и новое поколение оборудования для контактной стыковой сварки высокопрочных рельсов современного производства при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей. *Автоматическая сварка*, 6 (710), 32–40.
5. Кучук-Яценко С. И., Дидковский А. В., Швецов В. И. и др. (2016) Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства. *Там же*, 5-6 (753), 7–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.06.01>.
6. Костин В. А. (2012) Математическое описание углеродного эквивалента как критерия оценки свариваемости сталей. *Там же*, 8, 12–17.
7. Штайгер М. Г., Балановский А. Е. (2018) Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей. Часть 1. *Вестник Иркутского государственного технического университета*, 22, 6, 48–74. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-6-48-74.
8. Шевченко Р. А., Козырев Н. А., Усольцев А. А. и др. (2017) Способы получения качественного сварного соединения железнодорожных рельсов. *Труды XX Международной научно-практической конференции «Металлургия: Технологии, инновации, качество»*. Новокузнецк, СибГИУ, сс. 254–257.
9. Тихомирова Л. Б., Ильиных А. С., Галай М. С., Сидоров Э. С. (2016) Исследование структуры и механических свойств алюминотермитных сварных соединений рельсов. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*, 16, 3, 90–95.
10. Калашников Е. А., Королев Ю. А. (2015) Технология сварки рельсов в России и за рубежом. *Путь и путевое хозяйство*, 8, 2–6.
11. Козырев Н. А., Усольцев А. А., Шевченко Р. А. и др. (2017) Современные методы сварки рельсов нового поколения. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*, 60, 10, 785–791.
12. Ермаков В. М., Штайгер М. Г., Янович О. А. (2016) Электронный паспорт рельса. *Путь и путевое хозяйство*, 4, 13–17.
13. Генкин И. З. (2003) Термическая обработка стыков рельсов на индукционных установках. *Автоматическая сварка*, 9, 41–44.
14. Saita K., Karimine K., Ueda M. et al. (2013) Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach. *Nippon steel & sumitomo metal technical report*. December, 2013, 105, 84–92.
15. Андреева Л. А., Федин В. М., Башлыков А. В. и др. (2013) Термическое упрочнение сварных стыков рельсов на промышленном транспорте. *Промышленный транспорт XXI век*, 1, 19–20.
16. Машеков С. А., Абсадыков Б. Н., Алимкулов М. М., Смаилова Г. А. (2016) Проблемы сварки рельсов и их решение



- путем разработки перспективных способов индукционной сварки. Сообщение 1. Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан. ISSN 2224-5227, 305, 19–21.
- 17 Шур Е. А. (2006) Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов. Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов: материалы II Всерос. науч.-техн. семинара, Екатеринбург, 16–17 мая, 2006 г. Екатеринбург, Изд-во УИМ, сс. 37–64.
  - 18 Штайгер М. Г., Балановский А. Е. (2018) Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей (Обзор). Часть 2. Вестник Иркутского государственного технического университета, 22, 7, 41–68.
  - 19 Zaauman L. (2007) Continuous welded rail using mobile flash butt welding. *Civil Engineering*, 5, 62–65.
  - 20 (2012) *Manual for Flash Butt Welding of Rails*. Ministry of railways of India January.
  - 21 Girsch G., Keichel J., Gehrmann R. et al. Advanced rail steels for Heavy Haul application – track performance and weld ability Integrated Project (IP). *Thematic Priority 6: Project No. 5 Sustainable Development, Global Change and Ecosystems*.
  - 22 Pointner P., Joerg A. Jaiswal J. (2015) Definitive guidelines on the use of different rail grades. *Innovative track system*, 6, 41–42.
  - 23 Jilabi Abdul (2015) Welding of Rail Steels. A thesis submitted to the University of Manchester for the degree of PhD in the Faculty of Engineering and Physical Sciences.
  - 24 (2015) Continuous path in the United States on the Union Pacific network. *Railway gazette international*, 8, 42–43.
  - 25 Gong L., Zhu L., Zhou H. X. (2017) Effect on hardness and microstructures of rail joint with ultra-narrow gap arc welding by post weld heat treatment. *Engineering Materials*, 737, 90–94.
  - 26 Хлыст С., Кузмиченко В., Хлыст И., Гонтарь А. (2013) Опыт проведения дифференцированной термообработки рельсов воздушным способом по технологии «ТЭК-ДТ» на промышленной установке ТЭК-ДТО-20-13,6. *Инженерные решения*, 1, 1–4.
  - 27 Бабенко П. Г., Земан С. К. (2002) *Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов*. Томск, Изд-во Том. ун-та.
  - 28 Фещуков А. Н., Рубан В. В., Земан С. К. (2013) Комплекс высокочастотный индукционный нагреватель для термической обработки сварных стыков рельсов в путевых условиях. XV Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии», сс. 256–258.
  - 29 Резанов В. А., Федин В. М., Башлыков А. В. и др. (2013) Дифференцированная закалка сварных стыков рельсов. Вестник ВНИИЖТ, 2, 28–34.
  - 30 Пантелеймонов Е. А. (2018) К вопросу термической обработки сварных стыков железнодорожных рельсов. *Автоматическая сварка*, 3, 43–47. DOI: <https://dx.doi.org/10.15407/as2018.03.08>.
  - 31 Машеков С. А., Абсадыков Б. Н., Алимкулов М. М., Смаилова Г. А. (2016) Проблемы сварки рельсов и их решение путем разработки перспективных способов индукционной сварки. Сообщение 2. Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан. ISSN 2224-5227, 305, сс. 22–28.
- saving. *Zbirnyk Naukovykh Prats DonIZT*, 32, 263-268 [in Russian].
4. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Krivenko, V.G., Didkovsky, A.V. et al. (2012) Technology and new generation of equipment for flash-butt welding of advanced high-strength rails for construction and reconstruction of high-speed railway lines. *The Paton Welding J.*, 6, 22-26.
  5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, A.V., Shvets, V.I. et al. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *Ibid.*, 5-6, 4-12. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.06.01>.
  6. Kostin, V.A. (2012) Mathematical formulation of carbon equivalent as a criterion for evaluation of steel weldability. *Ibid.*, 8, 11-16.
  7. Shtajger, M.G., Balanovsky, A.E. (2018) Analysis of technologies for welding of high-strength rails from position of structure formation in construction and reconstruction of high-speed railway lines. Pt 1. *Vestnik Irkutskogo Gos. Tekhn. Un-ta*, 22(6), 48-74. DOI: 10.21285/1814-3520-6-48-74 [in Russian].
  8. Shevchenko, R.A., Kozyrev, N.A., Usoltsev, A.A. et al. (2017) Methods of producing of quality welded joint of railroad rails. In: *Proc. of 20th Int. Sci.-Pract. Conf. on Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality*. Novokuznetsk, SibGIU, 254-257.
  9. Tikhomirova, L.B., Iliinykh, A.S., Galaj, M.S., Sidorov, E.S. (2016) Examination of structure and mechanical properties of aluminothermic welded joints of rails. *Vestnik YuUrGU. Seriya Metallurgiya*, 16(3), 90-95 [in Russian].
  10. Kalashnikov, E.A., Korolyov, Yu.A. (2015) Technology of welding of rails in Russia and abroad. *Put i Putevye Khozyajstvo*, 8, 2-6 [in Russian].
  11. Kozyrev, N.A., Usoltsev, A.A., Shevchenko, R.A. et al. (2017) Modern methods of welding of new generation rails. *Izv. Vuzov, Chyorn. Metallurgiya*, 60(10), 785-791 [in Russian].
  12. Ermakov, V.M., Shtajger, M.G., Yanovich, O.A. (2016) Electronic certificate of rails. *Put i Putevye Khozyajstvo*, 4, 13-17 [in Russian].
  13. Genkin, I.Z. (2003) Heat treatment of rail welded joints in induction units. *The Paton Welding J.*, 9, 41-44.
  14. Saita, K., Karimine, K., Ueda, M. et al. (2013) Trends in rail welding technologies and our future approach. In: *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. December, 105, 84-92.
  15. Andreeva, L.A., Fedin, V.M., Bashlykov, A.V. et al. (2013) Thermal hardening of rail welded joints in industrial transport. *Proyshlennyj Transport XXI Vek*, 1, 19-20 [in Russian].
  16. Mashekov, S.A., Absadykov, B.N., Alimkulov, M.M., Smailova G.A. (2016) Problems of rail welding and their solution by mean of development of perspective methods of induction welding. *Information 1. Dokl. Nats. Akademii Nauk Respubliki Kazakhstan*, 305, 19-21, ISSN 2224-5227 [in Russian].
  17. Shur, E.A. (2006) Influence of structure on service stability of rails. Influence of properties of metallic matrix on service stability of rails. In: *Proc. of 2nd All-Russian Sci.-Techn. Seminar (Ekaterinburg, 16-17 May, 2006)*. Ekaterinburg, UIM, 37-64 [in Russian].
  18. Shtajger, M.G., Balanovsky, A.E. (2018) Analysis of technologies for welding of high-strength rails from a position of structure formation in construction and reconstruction of high-speed railway lines (Review). Pt 2. *Vestnik IGTV*, 22(7), 41-68 [in Russian].
  19. Zaauman, L. (2007) Continuous welded rail using mobile flash butt welding. *Civil Engineering*, 5, 62-65 [in Russian].
  20. (2012) *Manual for flash butt welding of rails*. Ministry of Railways of India, January.
  21. Girsch, G., Keichel, J., Gehrmann, R. et al. Advanced rail steels for heavy haul application – track performance and weld ability Intergrated Project (IP). *Thematic Priority 6. Project No. 5: Sustainable Development, Global Change and Ecosystems*.

## References

1. Gromov, V.E., Yuriev, A.B., Morozov, K.V. et al. (2014) Comparative analysis of structural-phase states in rails after volume and differential hardening. *Stal*, 7, 91-95 [in Russian].
2. Voronin, N.N., Prokhorov, N.N., Trynkova, O.N. (2012) Reserves of aluminothermic welding of rails. *Mir Transporta*, 2, 76-83 [in Russian].
3. Zhadan, G.I. (2012) Assessment of measures on improvement of continuous welded rail track from viewpoint of resource-

22. Pointner, P., Joerg, A., Jaiswal, J. (2015) Definitive guidelines on the use of different rail grades. *Innovative track system*, **6**, 41-42.
23. Jilabi, Abdul (2015) Welding of rail steels. In: Thesis for PhD Degree, University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sci.
24. (2015) *Railway Gazette International*, **8**, 42-43.
25. Gong, L., Zhu, L., Zhou, H.X. (2017) Effect on hardness and microstructures of rail joint with ultra-narrow gap arc welding by post weld heat treatment. *Engineering Materials*, **737**, 90-94.
26. Khlyst, S., Kuzmichenko, V., Khlyst I., Gontar, A. (2013) Experience of conducting of differentiated heat treatment of rails by air method according to the technology "TEK-DT" on industrial unit TEK-DTO-20-13.6. *Inzhenerye Resheniya*, **1**, 1-4 [in Russian].
27. Babenko, P.G., Zeman, S.K. (2002) *Problems of design of systems of high-frequency induction heating. Software of automation of technological processes*. Tomsk, Tomsk Un-t [in Russian].
28. Feshchukov, A.N., Ruban, V.V., Zeman, S.K. (2013) Complex of high-frequency induction heater for thermal treatment of rail welded joints in track conditions. 15th Int. Sci.-Pract. Conf. on Modern Engineering and Technologies, 256-258.
29. Rezanov, V.A., Fedin, V.M., Bashlykov, A.V. et al. (2013) Differentiated hardening of rail welded joints. *Vestnik VNIIZhT*, **2**, 28-34 [in Russian].
30. Panteleymonov, E.A. (2018) On the problem of heat treatment of welded joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, **3**, 36-39. DOI: <https://dx.doi.org/10.15407/as2018.03.08>.
31. Mashekov, S.A., Absadykov, B.N., Alimkulov, M.M., Smailova, G.A. (2016) Problems of rail welding and their solution by mean of development of perspective methods of induction welding. Information 2. *Dokl. Nats. Akademii Nauk Respubliki Kazakhstan*, **305**, 22-28, ISSN 2224-5227 [in Russian].

## ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК (Огляд)

**Р. С. ГУБАТЮК**

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

При будівництві високошвидкісних безстикових залізничних магістралей масово використовують високоміцні рейки, які зварюються різними способами. З появою високоміцних рейок з високим вмістом вуглецю особливої актуальності набула необхідність введення операції термічної обробки зварних стиків в цикл виготовлення рейкової пліти. Метою представленого огляду є аналіз проблем та прогноз перспектив сучасних технологій термічної обробки зварних стиків високоміцних рейок. Розглянуто різні способи термічної обробки, що застосовуються в промисловості. Проаналізовано різні схеми нагріву і охолодження зварного шва рейок і їх вплив на формування мікроструктури і механічних властивостей металу з'єднання. Огляд літературних даних показав, що при проведенні термічної обробки зварних стиків високоміцних рейок найбільш затребувана технологія нагріву струмами високої частоти з подальшим гартуванням головок. Бібліогр. 31, рис. 6.

*Ключові слова*: безстиковий рейковий шлях, високоміцні рейки, зварні стики, термічна обробка, твердість, мікроструктура, струми високої частоти, дефекти

## HEAT TREATMENT OF BUTT WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH RAILWAY RAILS (Review)

**R. S. GUBATYUK**

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

There is a mass use of high-strength rails, which are welded by different methods, in construction of high-speed continuous trunk railways. Necessity of implementation of heat treatment operation of butt welded joints into a rail string production cycle has acquired specific importance with appearance of high-strength rails having high content of carbon. An aim of presented review is analysis of the problems and forecast of the perspectives of current technologies of heat treatment of high-strength rail butt welded joints. Different methods of heat treatment used in industry were considered. Various schemes of heating and cooling of rail weld and their effect on formation of microstructure and mechanical properties of joint metal were analyzed. A review of references showed that the technology of heating with high-frequency currents with further quenching of a head is the most essential in performance of heat treatment of butt welded joints of high-strength rails. 31 Ref., 6 Fig.

*Keywords*: continuous rail track, high-strength rails, butt welded joints, heat treatment, hardness, microstructure, high-frequency currents, defects

Поступила в редакцію 21.09.2018



**ООО «Фрониус Украина»  
проводит семинар:**

**20 июня 2019 г. — «Роботизация сварочных процессов»**

**Контакты:** тел.: +38 044 277-21-41; факс: +38 044 277-21-44

E-mail: [sales.ukraine@fronius.com](mailto:sales.ukraine@fronius.com); [www.fronius.ua](http://www.fronius.ua)