



ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СОПРОТИВЛЯЕМОСТЬ ЗАМЕДЛЕННОМУ РАЗРУШЕНИЮ СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

В. Д. ПОЗНЯКОВ, д-р техн. наук, **В. М. КИРЬЯКОВ**, **А. А. ГАЙВОРОНСКИЙ**,
С. Б. КАСАТКИН, кандидаты техн. наук, **А. В. КЛАПАТЮК**, инж.

(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

С. Д. ТАРАНЕНКО, канд. техн. наук, **В. А. ПРОЩЕНКО**, инж. (ОАО «Днепропетровский стрелочный завод»)

Приведены результаты исследований влияния технологических факторов и конструктивной формы разделки на деформационную способность и циклическую долговечность сварных соединений рельсовой стали. Представлены зависимости изменения деформационной способности $h_{кр}$ стыковых соединений с V- и U-образной формами разделки кромок в зависимости от погонной энергии сварки, температуры предварительного подогрева и условий охлаждения соединений после сварки. Разработана технология дуговой сварки продольного стыка рельсовых окончаний железнодорожных крестовин.

Ключевые слова: дуговая сварка, рельсовая сталь, окончания железнодорожных крестовин, сварные соединения, деформационная способность, циклическая долговечность, сопротивляемость разрушению

Крестовины стрелочных переводов железнодорожных путей изготавливают из высокомарганцевой стали 110Г13 (сталь Гадфильда). В Украине такие крестовины производят на стрелочных заводах в Днепропетровске и Керчи с использованием технологии литья. Поскольку стрелочные крестовины имеют сложную форму, то существующие технологические процессы их изготовления трудоемки и энергозатратны, что сказывается на их стоимости. Следует также отметить, что испарение марганца при отливке изделий из стали 110Г13 ухудшает санитарно-гигиенические условия труда и экологию окружающей среды. Существенно снизить себестоимость стрелочных переводов и улучшить экологическую ситуацию на производствах можно путем использования для изготовления крестовин рельсовой стали. При этом появляется возможность замены в железнодорожных путях болтовых соединений крестовин с рельсами сварными, за счет этого уменьшаются динамические нагрузки на полотно и увеличивается скорость движения поездов [1]. Данный путь модернизации инфраструктуры железных дорог в настоящее время развивается во всем мире.

Наиболее широко производство сварных конструкций крестовин налажено в Европе на фирме «Voest-Alpine» (Австрия). В соответствии с предложенной технологией сварка продольного шва рельсового окончания, изготавливаемого из рельсовой стали, выполняется автоматическим спосо-

бом проволокой сплошного сечения диаметром 3 мм под слоем флюса. В дальнейшем готовое рельсовое окончание, длина которого может изменяться от 1,5 до 3,6 м, приваривается контактным способом к сердечнику (сталь 110Г13) с использованием вставки из стали 10Х18Н10Т.

Опытные образцы сварных крестовин с окончанием из рельсовой стали отечественного производства (рис. 1) изготовлены на Муромском стрелочном заводе и апробированы на полигоне «Кольцо» (ст. Щербинка, Московской области, РФ). Испытания, проведенные при нагрузке 27 т на ось, согласно методике показали, что только две из трех крестовин, изготовленных по технологии фирмы «Voest-Alpine», успешно прошли проверку, в то время как одна из них разрушилась раньше нормативного срока (менее 80 млн т на километр пробега).

Усталостная трещина в данной крестовине образовалась в конце стыкового шва (кратерная зона) и развивалась в перпендикулярном по отношению к оси шва направлении. По-видимому, это связано с тем, что повышенное тепловложение, характерное для автоматической сварки под флюсом, способствует формированию в сварных соединениях рельсовой стали относительно широкой зоны термического влияния (ЗТВ), в которой образуется структура, отличающаяся повышенной склонностью к хрупкому разрушению. В связи с этим следовало разработать новую технологию сварки продольного стыка стрелочных окончаний, позволяющую избежать указанных недостатков.

Цель данной работы заключалась в оценке влияния технологических (температура предвари-

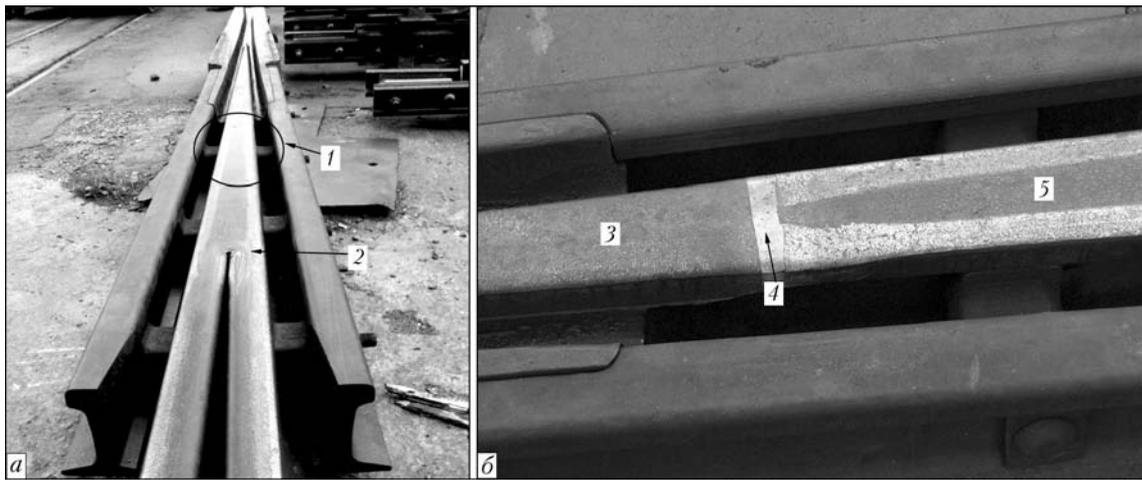


Рис. 1. Сварная железнодорожная крестовина с рельсовым окончанием: *а* — общий вид; *б* — участок в месте сварки сердечника с рельсовым окончанием: 1 — участок крестовины в месте сварки сердечника с рельсовым окончанием; 2 — место разрушения рельсового окончания; 3 — сердечник из стали 110Г13; 4 — вставка из стали 10Х18Н10Т; 5 — рельсовое окончание из стали М76

тельного подогрева и погонная энергия сварки) и конструктивных факторов на деформационную способность и долговечность сварных соединений рельсовой стали в условиях статического и циклического нагружений.

Исследования проводили на стыковых соединениях из высокоуглеродистой кремниевомарганцовистой рельсовой стали марки М76 с содержанием 0,71...0,82 % углерода и 0,75...1,05 % марганца.

Влияние технологических факторов и конструктивной формы разделки на прочностные свойства соединений рельсовой стали при статическом нагружении изучали в условиях испытаний сварных образцов на трехточечный изгиб на установке Фридлянда. Образцы нагружали усилием 3000 кг со скоростью 1 мм/мин. Критерием оценки таких испытаний был уровень критической деформации образцов $h_{кр}$, при котором еще не про-

исходит образование трещины на поверхности сварного соединения. Сварные образцы для испытаний представляли собой стыковые соединения рельсовой стали размером 240×85×18 мм. Исследовали особенности разрушения многопроходных соединений рельсовой стали с V- и U-образной формами разделки, оценивали влияние значения погонной энергии сварки (8,6 и 28,5 кДж/см), предварительного подогрева при температурах 150 и 250 °С, а также условий охлаждения соединений после сварки. В качестве сварочного материала использовали низколегированную проволоку Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Механизированную сварку образцов осуществляли в смеси защитных газов (80 % Ar + 20 % CO₂).

При этом были использованы результаты ранее выполненных работ по оценке влияния термомеханического цикла сварки на формирование структуры, изменение прочностных и пластических свойств в металле ЗТВ рельсовой стали, а также температуры предварительного подогрева и погонной энергии сварки на сопротивляемость сварных соединений образованию холодных трещин [2, 3].

Результаты проведенных исследований по оценке влияния технологических факторов и конструктивной формы разделки на деформационную способность сварных соединений рельсовой стали, полученные при испытании на статический изгиб, приведены на рис. 2–5.

Как видно из представленных данных, форма разделки существенно влияет на показатели критической деформации образцов. Для сварных соединений с U-образной формой разделки $h_{кр}$ в 1,5...2,0 раза выше, чем у сварных соединений с V-образной формой разделки (рис. 2). Использование при сварке соединений рельсовой стали с U-образной формой разделки предварительного подогрева до 250 °С способствует повышению

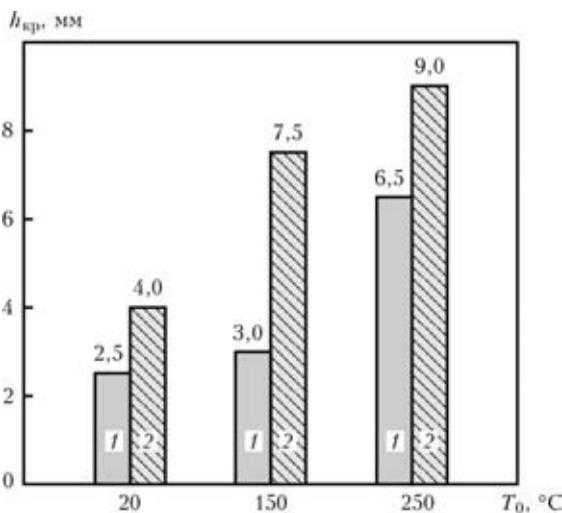


Рис. 2. Влияние V- (1) и U-образной (2) форм разделки и температуры предварительного подогрева T_0 на критическую деформацию сварных соединений $h_{кр}$ рельсовой стали, выполненных на погонной энергии сварки $Q_{св} = 8,6$ кДж/см

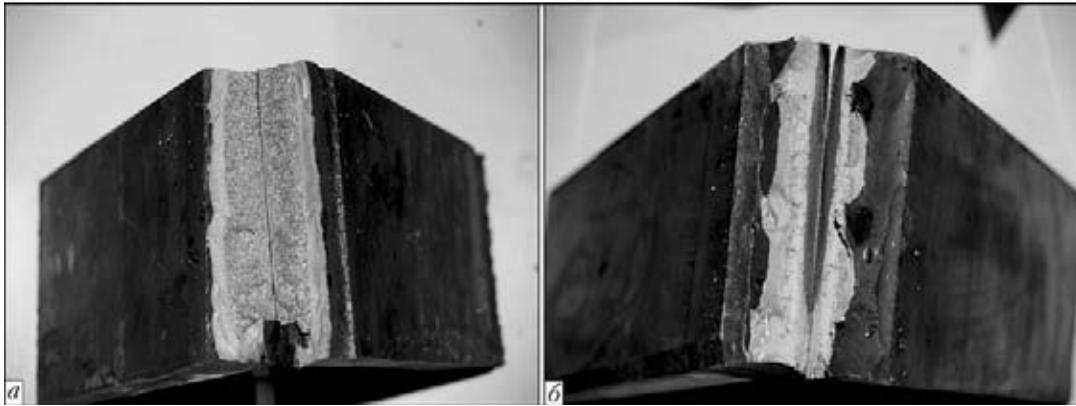


Рис. 3. Характерные изломы сварных соединений рельсовой стали с V- (а) и U-образной (б) формами разделки, выполненных с предварительным подогревом до 150 °С на погонной энергии 8,6 кДж/см после испытаний на трехточечный изгиб

значения $h_{кр}$ в 1,5 раза. При этом также изменяется характер самого разрушения сварных соединений. Образование трещин и разрушение соединений с V-образной формой разделки происходило исключительно по металлу зоны сплавления и околошовной (участок крупного зерна ЗТВ). Поверхность разрушения образцов отличалась крупнокристаллической структурой, что является признаком хрупкого разрушения (рис. 3). Разрушение сварных соединений с U-образной формой разделки протекало вязко, преимущественно по металлу шва, поверхность излома мелкокристаллическая.

Увеличение погонной энергии сварки от 8,6 до 28,5 кДж/см позволяет дополнительно повысить значение $h_{кр}$ соединений рельсовой стали практически в 1,3 раза (рис. 4).

Для повышения сопротивляемости сварных соединений высокоуглеродистых сталей против образования холодных трещин широко используют технологический процесс, направленный на замедление их охлаждения после сварки. Это способствует релаксации сварочных напряжений в соединениях и более полному протеканию про-

цессов диффузии водорода в металле. Так, например, гребни колес грузовых вагонов после восстановительной наплавки охлаждают в специальных термокамерах [4]. Оценка влияния данной технологической операции на сопротивляемость сварных соединений рельсовой стали статическому нагружению изгибом была целью дальнейших исследований, проводимых применительно к стыковым соединениям рельсовой стали с U-образной формой разделки кромок, сварку которых осуществляли проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм в смеси газов на погонной энергии 28,5 кДж/см с предварительным подогревом до 250 °С. Одну часть образцов после сварки охлаждали на воздухе, а другую — помещали в термокамеру. Таким образом, скорость их охлаждения замедлялась до 50 °С/ч. Результаты выполненных исследований, представленные на рис. 5, свидетельствуют о том, что данная технологическая операция позволяет повысить уровень кри-

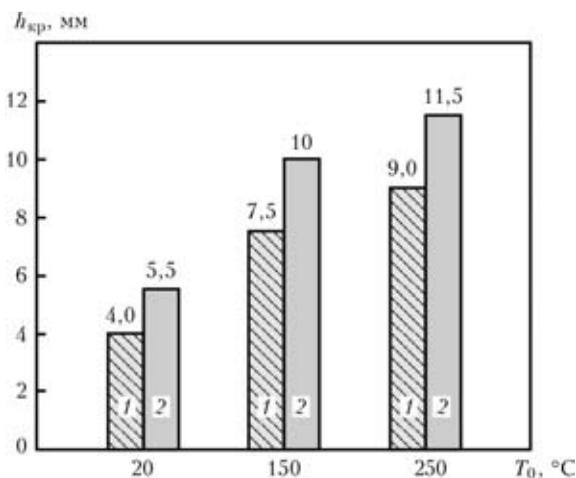


Рис. 4. Влияние погонной энергии сварки и температуры предварительного подогрева на критическую деформацию сварных соединений рельсовой стали с U-образной формой разделки: 1 — 8,6; 2 — 28,5 кДж/см

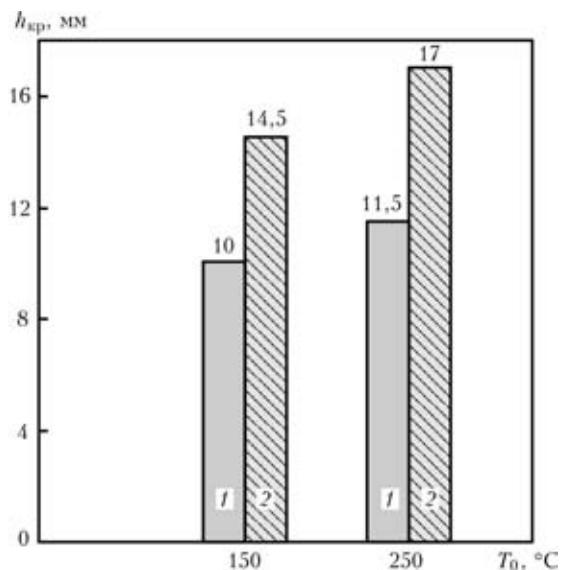


Рис. 5. Влияние условий послесварочного охлаждения на критическую деформацию сварных соединений рельсовой стали с U-образной формой разделки, выполненных на погонной энергии 28,5 кДж/см: 1 — охлаждение на воздухе при 20 °С; 2 — охлаждение в термокамере со скоростью 50 °С/ч

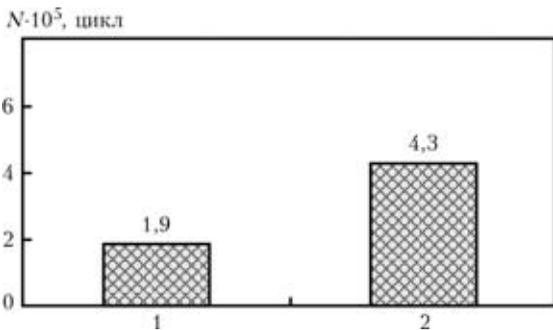


Рис. 6. Влияние V- (1) и U-образной (2) форм разделки на циклическую долговечность сварных соединений рельсовой стали

тической деформации сварных соединений рельсовой стали, по сравнению с образцами, охлаждение которых производили на воздухе практически на 40 %.

Выполненные исследования показали, что за счет перехода от V- к U-образной форме разделки кромок, повышения погонной энергии сварки от 8,6 до 28,5 кДж/см, применения предварительного подогрева соединений до 250 °С и замедления скорости охлаждения после сварки до 50 °С/ч деформационную способность сварных соединений рельсовой стали можно повысить более чем в четыре раза.

Влияние формы разделки кромок на сопротивляемость сварных соединений рельсовой стали усталостным разрушениям исследовали в соответствии с общепринятыми методами испытаний на усталость [5] на установке УМП-1 при симметричных циклах нагружения изгибом с частотой 14 Гц при напряжении цикла 40 МПа. В качестве образцов использовали стыковые соединения рельсовой стали размером 250×85×18 мм с V- и U-образной формами разделки без полного провара, что позволило смоделировать условия выполнения продольного шва рельсовых окончаний.

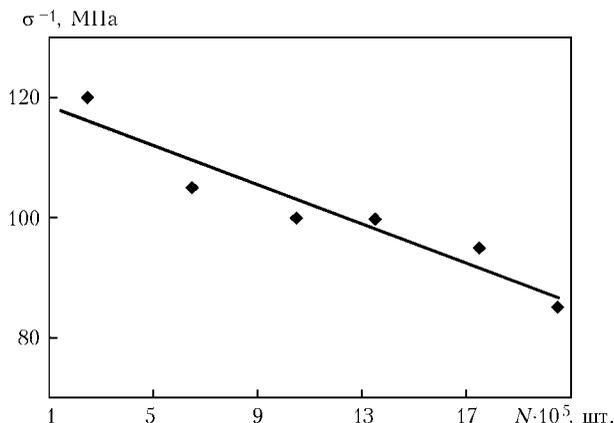


Рис. 7. Влияние напряжений цикла на циклическую долговечность сварных соединений рельсовой стали с U-образной формой разделки, выполненных с предварительным подогревом до 250 °С на погонной энергии 28,5 кДж/см

Образцы сваривали без предварительного подогрева в смеси защитных газов проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм на режимах, обеспечивающих погонную энергию 9,2 кДж/см при выполнении корневого валика шва и 28,5 кДж/см при заполнении оставшейся части разделки. Это, с одной стороны, дало возможность уменьшить долю участия основного металла в металле шва, а с другой — избежать образования горячих трещин в соединении.

В результате выполненных исследований установлено (рис. 6), что сопротивляемость разрушению при циклическом нагружении сварных соединений с V-образной формой разделки в два раза ниже, чем у соединений с U-образной формой разделки (образование усталостной трещины длиной 3 мм отмечено соответственно после 190000 и 430000 циклов нагружения).

Разрушение сварных соединений с V-образной формой разделки происходило по линии сплавления и металлу ЗТВ. Усталостная трещина в соединениях с U-образной формой разделки также образовалась на линии сплавления в зоне непровара. Дальнейшее их разрушение происходило по металлу шва. Таким образом, с позиций статической и циклической долговечности при изготовлении сварных соединений рельсовой стали предпочтение следует отдавать соединениям с U-образной формой разделки. Применительно к таким соединениям проводили исследования на завершающей их стадии.

Как и в предыдущем случае, сварку образцов осуществляли в смеси газов проволокой Св-08Г2С. Режимы сварки оставались неизменными. Отличие состояло в том, что образцы сваривали с полным проваром, перед сваркой их подогревали до температуры 250 °С, а после сварки помещали в термокамеру с целью замедления скорости их охлаждения. Таким образом воспроизвели технологический процесс, при котором свар-

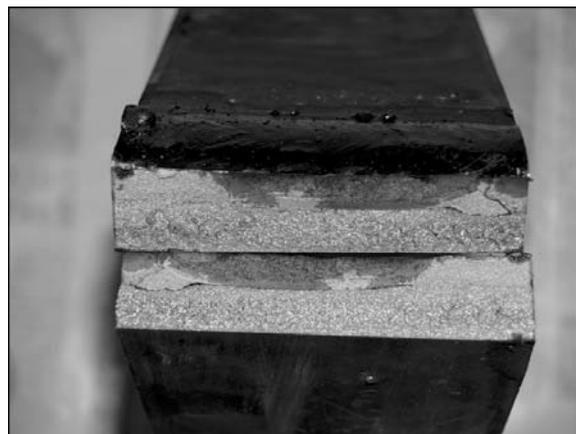


Рис. 8. Поверхность излома сварного соединения рельсовой стали с U-образной формой разделки, выполненного с предварительным подогревом до 250 °С на погонной энергии 28,5 кДж/см после циклического нагружения изгибом



ные соединения рельсовой стали приобретали наибольшую деформационную способность.

Результаты испытаний, проводимых при напряжениях цикла 120, 105, 95 и 85 МПа, приведены на рис. 7. Они показали, что при напряжении цикла 120 МПа усталостные трещины длиной 3 мм образовывались после примерно 220000 циклов нагружения, еще через 50000 циклов нагружения образцы разрушались полностью. Зарождение и начальное развитие трещины происходило по линии сплавления, а затем по околшовному металлу ЗТВ. Отмечено, что после того, как трещина образовалась на 10 % общей площади сечения образца, дальнейшее его разрушение происходило хрупко (рис. 8).

При снижении напряжения цикла до 105 МПа усталостная трещина длиной 3 мм образовалась после 643000 циклов, а при 95 МПа — через 1760000 циклов нагружения.

В двух из трех образцов, испытание которых проводили при напряжении цикла 85 МПа, после 2000000 циклов трещины не обнаружены и поэтому испытания прекратили. В одном из образцов усталостная трещина длиной менее 1 мм образовалась на линии сплавления соединения после 1901000 циклов нагружения, но поскольку при дальнейшем нагружении она не развивалась, испытания также прекратили. Это дало нам основание считать нагрузку в 85 МПа условным пределом выносливости сварных стыковых соединений рельсовой стали, выполненных по предложенной технологии.

Дополнительные исследования по отработке предложенной технологии сварки соединений рельсового окончания проводили при изготовлении опытной партии стрелочных переводов на ОАО «Днепропетровский стрелочный завод». Эксплуатационные испытания стрелочных переводов с рельсовыми окончаниями, электродугую сварку которых выполняли по разработанной технологии, подтвердили высокие надежность и качество изделий. На основании этих испытаний технология электродуговой сварки рельсовых

окончаний внедрена в серийное производство, а на разработанный способ дуговой сварки продольного шва рельсового окончания выдан патент Украины [6].

Выводы

1. Установлено, что конструктивно продольные швы рельсового окончания следует выполнять с U-образной формой разделки.

2. Показано, что механизированную сварку рельсового окончания необходимо осуществлять на повышенных значениях погонной энергии в смеси защитных газов на режимах, обеспечивающих струйный процесс переноса электродного металла.

3. Определено, что для обеспечения высокой деформационной способности и повышения долговечности сварных соединений рельсовой стали перед сваркой их следует подогревать до температуры 250 °С, а после сварки — обеспечивать замедленное охлаждение со скоростью около 50 °С/ч.

1. Кучук-Яценко С. И., Швец Ю. В., Кавуниченко А. В. Работоспособность соединений железнодорожных крестовин, выполненных контактной стыковой сваркой // Автомат. сварка. — 2008. — № 9. — С. 39–42.
2. Сергиенко Ю. В., Сагиров И. В. Прогнозирование возникновения закалочных структур при сварке рельсовых сталей // Сб. докл. по материалам науч. семинара «Современные достижения в области сварки, наплавки и родственных технологий» (Мариуполь, нояб. 2000 г.). — Мариуполь: Приазов. гос. ун-т, 2000. — С. 9–12.
3. Формирование свойств сварных соединений рельсовой стали при электродуговой сварке / В. Д. Позняков, В. М. Кирьяков, А. А. Гайворонский и др. // Автомат. сварка. — 2010. — № 8. — С. 16–20.
4. Влияние технологических факторов на структуру и свойства металла ЗТВ при ремонтно-восстановительной наплавке гребней цельнокатаных вагонных колес / В. А. Саржевский, А. А. Гайворонский, В. Г. Гордонный, В. Ф. Горб // Там же. — 1996. — № 3. — С. 22–27, 33.
5. Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / Под ред. В. И. Труфякова. — Киев: Наук. думка, 1990. — 255 с.
6. Пат. 91938 Україна, МПК В 23 К 9/16, В 23 К 9/23. Спосіб електродугового зварювання / С. Д. Тараненко, В. А. Прощенко, В. М. Кір'яков та ін. — Опубл. 10.09.2010; Бюл. № 17.

Investigation results on the effect of the technological factors and groove shape on deformability and cyclic fatigue life of welded joints on rail steel are given. Dependences of variations in deformability hcr of butt joints with the V- and U-grooves on the welding heat input, preheating temperature and conditions of cooling of the joints after welding are presented. The technology developed for arc welding of longitudinal joints in rail ends of railway frogs is considered.

Поступила в редакцию 30.06.2011