

# ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ РЕЛЬСОВ: 60 ЛЕТ НЕПРЕРЫВНЫХ ИННОВАЦИЙ

С. И. КУЧУК-ЯЦЕНКО

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

В статье обобщен 60-летний опыт Института электросварки им. Е. О. Патона по инновационным решениям в области разработки технологий и оборудования контактной сварки оплавлением железнодорожных рельсов. Многие из них являются пионерскими, что подтверждается рядом лицензионных соглашений с ведущими странами мира. Сегодня парк эксплуатируемых в мире контактных машин и комплексов, разработанных в ИЭС и изготавливаемых Каховским заводом электросварочного оборудования, исчисляется количеством более 2500, что составляет около 60 % мирового парка машин. Библиогр. 13, табл. 4, рис. 22.

*Ключевые слова:* контактная стыковая сварка, железнодорожные рельсы, эвтектичные и заэвтектичные стали, технологии и оборудование, непрерывное оплавление, пульсирующее оплавление, моделирование нагрева, длинномерные плети, сварка с натяжением, мониторинг качества

В послевоенный период для восстановления десятков тысяч километров железнодорожных путей, разрушенных или изношенных в период войны, срочно требовалось выполнить большой объем работ по сварке рельсов. Имеющиеся несколько рельсосварочных цехов в различных регионах страны, оборудованных импортными машинами для контактной сварки рельсов, не могли справиться с этой задачей, так как не располагали достаточной энергетической базой и необходимой для энергоснабжения контактных машин мощностью 400...500 кВ·А, также не была решена главная задача: сварка рельсов в пути при сооружении бесстыковых путей. Использование других известных технологий сварки рельсов — электродуговой и термитной не обеспечивали требуемый уровень механических свойств сварных соединений в бесстыковых путях. Кроме этого, они значительно уступали контактной сварке по производительности и себестоимости работ. Перед коллективом ИЭС в начале 1960-х гг. правительством была поставлена задача создать технологию и оборудование для сварки рельсов непосредственно в пути при укладке бесстыковых путей. Для этого необходимо было решить первоочередные задания:

- изыскать возможность значительного снижения мощности сварочной машины и, соответственно, необходимого источника энергоснабжения;
- значительно уменьшить массу сварочного оборудования, что позволило бы маневрировать сварочной машиной при сварке рельсов уложенных в путь;
- полностью автоматизировать процесс сварки и исключить влияние точности подготов-

ки концов рельсов перед сваркой на качество соединений;

- разработать технологию сварки, обеспечивающую равнопрочность сварных соединений с основным металлом и высокую стойкость циклическим нагрузкам.

В основу разработки технологии контактной сварки рельсов принят метод нагрева металла непрерывным оплавлением (НО). Процесс НО используют в промышленности для контактной сварки деталей с толщиной стенки до 10...12 мм [1]. Он отличается стабильным энерговыделением и качеством соединений при сварке тонкостенных деталей. При сварке деталей с большими толщинами элементов сечения, в том числе рельсов, в мировой практике НО не применяется, так как не обеспечивает требуемого нагрева торцов соединяемых материалов. Кроме этого, для возбуждения НО требуется значительная мощность.

В ИЭС разработаны способы и устройства для существенного снижения мощности, необходимой для возбуждения НО [2], а также для интенсификации нагрева при оплавлении за счет повышения его термического КПД. Главным из них является изыскание процессов устойчивого оплавления при низких удельных мощностях за счет одновременного регулирования мгновенных значений напряжения и скорости при оплавлении с использованием обратных связей по величине сварочного тока.

Установлено [3], что одним из главных условий стабильного воспроизведения процесса устойчивого оплавления является снижение сопротивления короткого замыкания сварочного контура контактных стыковых машин ( $Z_{к.з}$ ). За счет оригинальной конструкции сварочного контура, где в качестве токоведущих элементов его использо-

ваны силовые узлы контактных машин, удалось значительно снизить  $Z_{к.з.}$ . В результате использования этих новаций значительно (в 2,5...3,0 раза) снижена мощность, потребляемая при сварке и, соответственно, источников энергоснабжения. Процесс сварки был полностью автоматизирован, обеспечивая высокое и стабильное качество сварных соединений. На базе этой технологии разработаны первые мобильные машины для сварки рельсов в пути. В результате выполнения этих работ разработаны принципиально новые технологии сварки НО с программным регулированием основных параметров [4]. Уже в начале 1960-х гг. были разработаны и изготовлены в ИЭС мобильные и рельсосварочные машины типа К155. Машины отличались небольшой массой (2 т вместо 15...20 т) и меньшей мощностью (150 кВт вместо 350...500 кВт) по сравнению с лучшими стационарными машинами для контактной сварки рельсов. В основу системы управления машин положены разработки ИЭС [5]. Первый образец промышленной рельсосварочной машины (К355) был изготовлен в ИЭС и прошел испытания на железных дорогах Украины. На базе этой машины созданы первые в мировой практике мобильные комплексы для контактной сварки рельсов в пути. По документации, разработанной в ИЭС, промышленное производство машин К355 с 1960 г. освоено Каховским заводом электросварочного оборудования (КЗЭСО). К концу 1960-х гг. на железных

дорогах постсоветского пространства уже работало около 100 машин К355, внедрение которых выполняли специалисты ИЭС. С учетом опыта производственной эксплуатации первых партий сварочных машин совершенствовалась их конструкция, создавались различные передвижные рельсосварочные комплексы (рис. 1), в состав которых входили кроме сварочных машин, самоходные установки с подъемными механизмами на базе передвижных платформ (см. рис. 1, а), а также на базе вездеходов (см. рис. 1, б). В передвижных комплексах использовались стандартные электростанции мощностью 200...250 кВт. В передвижных рельсосварочных комплексах типа ПРСМ (см. рис. 1, а), используемых на железных дорогах бывших советских республик для повышения производительности, устанавливались две сварочные машины, каждая из которых ориентирована на одну рельсовую плетть. Такая схема работ была принята при реконструкции пути с полной заменой секций рельсов. Для ремонтных работ использовались комплексы с одной машиной. Весьма эффективны оказались комплексы на основе вездеходов (см. рис. 1, б). В этом случае не требуются электростанции для энергоснабжения сварочных машин. Обе сварочные машины, работающие одновременно, получают энергопитание от одного генератора, соединенного с дизелем вездехода. С начала 1970-х гг. мобильные рельсосварочные машины, изготавливаемые КЗЭСО, начали экспортироваться в различные страны мира. Первые партии машин были поставлены во Францию (фирмы Матиза), Австрию (Пласер), США (Холланд). При этом использовались различные передвижные комплексы на автомобильном и железнодорожном ходу, разработанные на базе машины К355 с учетом различных форм организации работ при реконструкции и ремонте железных дорог. В процессе внедрения и эксплуатации десятков и сотен машин в различных странах, в ИЭС продолжались работы по созданию технологии сварки рельсов НО с учетом различных типоразмеров и химического состава рельсовых сталей, отрабатывались оптимальные режимы сварки и типовые программы управления процессом сварки. Одна из таких типовых программ приведена на рис. 2. При этом были определены алгоритмы оценки качества соединений по отклонениям регистрируемых величин от заданных программ. Разработаны единые рекомендации по оценке качества соединений рельсов в режиме реального времени сразу же после выполнения сварки по результатам операционного контроля. Операционный контроль стал неотъемлемой частью технологий при контактной сварке рельсов. Особенно актуальным такой контроль оказался при



Рис. 1. Передвижные рельсосварочные комплексы с машиной К355: а — ПРСМ; б — РСА

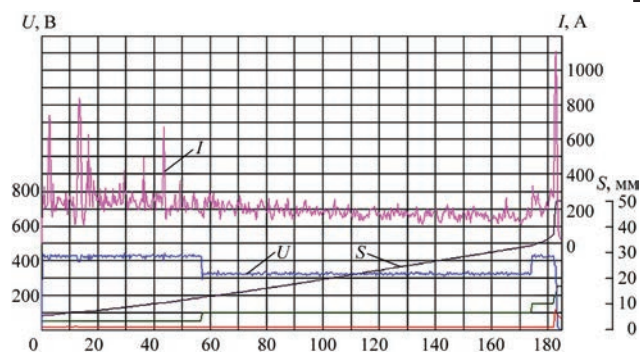


Рис. 2. Типовая программа изменения основных параметров при сварке рельсов НО



Рис. 3. Мобильная рельсосварочная машина K900

выполнении работ на удаленных участках железнодорожных путей. Операционный контроль при сварке рельсов на железных дорогах был введен нормативными документами с 1980-х гг. как обязательная операция при выполнении сварки рельсов. На его основе с начала 1990-х гг. разработаны компьютеризированные системы управления основными параметрами сварки, которыми было оборудовано новое поколение рельсосварочных машин типа K900 (рис. 3). В странах СНГ такие машины пришли на смену машинам K355. С начала 1990-х гг. машины K900 начали экспортироваться в Европу, США и Китай.

**Технологии и оборудование для контактной сварки высокопрочных рельсов эвтектоидной и заэвтектоидной структуры.** Увеличение грузо-

напряженности и скорости движения на железных дорогах в последнее десятилетие вызвало необходимость повышения механических свойств рельсов, их износостойкости и ресурса работы. Большинство высокопрочных рельсов современного производства имеют гарантированный ресурс работы в 1,5...2,0 раза выше, чем рельсы предыдущих поколений. Это достигнуто за счет применения новых технологий производства рельсовой стали с использованием конверторного процесса в сочетании с непрерывной прокаткой и вакуум-регулированием. При этом используется объемное или дифференцированное термическое упрочнение рельсового проката. Освоено производство рельсов эвтектоидного и заэвтектоидного класса, позволившее значительно повысить твердость и износостойкость рельсовой стали. Химический состав и механические свойства таких рельсов приведены в табл. 1. При контактной сварке таких рельсов с использованием технологий, применяемых для соединения рельсов с содержанием углерода на уровне заэвтектоидных сталей, не обеспечивались требуемые показатели механических свойств.

Одной из причин снижения показателей механических свойств является разупрочнение металла в зоне сварки, в результате формирования крупнозернистой структуры в центральной части сварного шва, снижающей прочность соединения. Уменьшение энергозатрат за счет сокращения длительности процесса оплавления оказывает положительное влияние на улучшение структуры, но приводит к появлению дефектов в зоне соединения [6], которые значительно снижают показатели прочности и пластичности сварных соединений. Установлена взаимосвязь между появлением дефектов в плоскости соединения с формированием искрового зазора, в частности, при оплавлении, в участках с максимальной величиной искрового зазора  $\Delta_{z\max}$  и толщиной расплава на поверхности оплавления  $\delta_{ж}$ , а также градиента температурного поля в приконтактном слое торцов деталей [7]. Формирование дефектов происходит, если расплав успевает закристаллизоваться до начала де-

Таблица 1. Химический состав и механические свойства высокопрочных рельсов современного производства

Марка стали	Химический состав, %					
	C	Mn	Si	V	Ti	Cr
M76	0,71...0,82	0,80... 1,30	0,25...0,45	-	-	-
K76Ф	0,71...0,82	0,80... 1,30	0,25...0,45	0,03...0,07	-	-
Э76Ф; K76Ф	0,71...0,82	0,75...1,05	0,25...0,45	0,03...0,15	-	-
R260	0,62...0,82	0,70...1,20	0,15...0,58	0,03	-	≤ 0,15
R350HT	0,72...0,82	0,70...1,20	0,15...0,58	0,03	-	≤ 0,15
R350HT	0,72...0,82	0,15...0,60	0,65...0,75	0,03	-	0,15
BC-350Я; 350ЛТД	0,72...0,82	0,7...1,2	0,35...1,0	0,01	0,025	0,3...0,7
AREAL 136 10 SP	0,81...0,82	1,0...1,15	0,50 ... 0,54	0,005	0,002	1,3...1,22
AREAL 136 HE370	0,99...1,00	0,69...0,71	0,50...0,52	0,002	0,001	0,21...0,22

Окончание табл. 1.

Марка стали	Твердость <i>HВ</i>	Предел прочно- сти $\sigma_B$ , МПа	Предел теку- чести $\sigma_T$ , МПа	Относитель- ное удлине- ние $\delta$ , %	Относитель- ное сужение $\psi$ , %	Завод изготовитель
M76	260...280	800...1100	500...700	$\geq 6$	$\geq 20$	ПАО МК «Азовсталь» (Украина)
K76Ф	341...388	1300...1380	950...1050	10...15	25...35	
Э76Ф; K76Ф	370...410	1180	800	8	25	«Евраз» (РФ)
R260	260...300	942...980	498...540	10...15	15...25	Huta Katowice (Польша)
R350HT	350...380	1240...1300	-	9...12	-	Franch Rail (Франция)
R350HT	350...380	1240...1300	-	9...12	-	Voestalpine Schienen GmbH (Австрия)
BC-350Я; 350ЛТД	362...400	>1240	-	>9	-	Nippon Steel (Япония)
AREAL 136 10 SP	388...420	1350...1400	840...950	12...15	-	
AREAL 136 HE370	380...430	1320...1350	850...950	12...15	22...25	

формации торцов. Для получения качественных соединений необходимо выполнить условие: длительность кристаллизации расплава  $t_p$  на торцах оплавленных деталей:

$$t_p \geq \frac{\Delta_{з\max}}{v_k},$$

где  $t_p$  — длительность кристаллизации жидкого слоя расплава толщиной  $\delta_{ж}$ ;  $\Delta_{з\max}$  — максимальная величина искрового зазора;  $v_k$  — конечная скорость оплавления перед осадкой.

$$t_p \rightarrow f(\delta_{ж}, \theta_{ж}, A) \lambda \frac{d\theta}{dx},$$

где  $\theta$  — средняя температура расплава;  $A$  — безразмерный параметр, определяемый теплофизическими свойствами стали;  $\lambda \frac{d\theta}{dx}$  — градиент температурного поля в приконтактном слое.

При увеличении градиента температурного поля продолжительность времени кристаллизации сокращается и возрастает вероятность формирования дефектов. Чтобы обеспечить требуемые условия кристаллизации, необходимо увеличить конечную скорость оплавления перед осадкой  $v_k$ , либо уменьшить величину  $\Delta_{з\max}$ . Повышение скорости оплавления  $v_k$  предусмотрено программой изменения напряжения при НО, но возможности этой меры в значительной степени исчерпаны, так как дальнейшее увеличение  $v_k$  связано с необходимостью повышения напряжения  $U_2$  и

сопровождается увеличением глубины кратеров. При этом уменьшается величина  $\delta_{ж}$ . Исследованиями, проведенными в ИЭС, установлено, что регулирование искрового зазора за счет изменения мгновенной скорости подачи в сочетании с изменением напряжения, позволяет подавить взрывообразный процесс ее оплавления (при котором формируется рельеф поверхности оплавления), повысить его термический КПД и увеличить интенсивность нагрева. При этом уменьшается величина  $\Delta_{з\max}$ . Процесс получил название пульсирующего оплавления (ПО) [8]. Его применение позволяет изменять интенсивность нагрева при плавлении в широких пределах, при этом наряду с высокими градиентами температурного поля обеспечивается нагрев до высокой температуры приконтактного слоя металла, уменьшается величина искрового зазора и создаются благоприятные условия для формирования соединений при пониженном энергозатратении. На рис. 4 приведены зависимости, характеризующие изменение термического КПД в процессе ПО, а также для сравнения при НО, рельсов типа Р65. Расчет основных параметров, характеризующих нагрев, выполнен с использованием математического моделирования нагрева при НО. В основу расчета положена модель нагрева единичного контакта при изменении плотности тока, проходящего через контакт, температуры нагрева торцов деталей, степени перегрева. Как видно из приведенного графика, КПД при НО достаточно высокий в начальный период оплавлением — 0,7 и снижается по мере повышения температуры торцов деталей до 0,45 [9]. Снижение напряжения в процессе сварки позволяет его повысить до 0,5. Это предельно возможное значение, достигнутое при НО. Из анализа зависимости видно, что при НО имеется значительный резерв повышения интенсивности нагрева за счет повышения термического КПД, особенно во второй период, предусмотренный программой (см. рис. 4). При использовании ПО имеется воз-

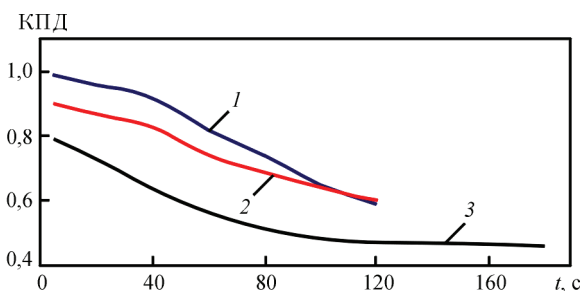


Рис. 4. Зависимость термического КПД от длительности оплавления при ПО (1, 2) и НО (3): 1 — 120 с,  $I = 450$  А; 2 — 120 с,  $I = 370$  А; 3 — 180 с,  $I = 170$  А

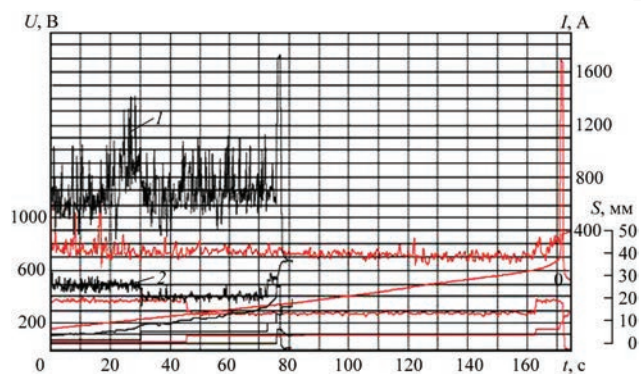


Рис. 5. Запись основных параметров сварки при ПО (1) и НО (2)

возможность повышения среднего тока  $I_{св}$ , протекающего через образцы, за счет увеличения площади одновременно существующих контактов, не повышая средней скорости укорочения деталей, за счет регулирования мгновенных значений скоростей подачи и напряжения  $U_2$ . На рис. 5 приведены записи значений тока при ПО и НО. В обоих случаях установлены одинаковые программы изменения напряжения  $U_2$  средней скорости подачи  $v_{п.}$ . За счет регулирования мгновенных скоростей подачи, среднее значение тока и напряжения поддерживаются в заданном уровне, а значение среднего тока при оплавлении существенно увеличивается (на 35 % в первом периоде оплавления и на 30 % во втором). При ПО процесс нагрева быстрее достигает квазистационарного состояния и нагрев стабилизируется на этом уровне. Распределение температуры в металле ЗТВ существенно изменяется. Температура приконтактных слоев металла несмотря на снижение энерговыделения повышается, а ширина ЗТВ уменьшается (рис. 6). При этом изменяется соотношение энергии, генерирующейся в единичных контактах и теряемой при их разрушении. Подавление взрывообразной фазы нагрева контакта, когда металл доводится до кипения, сокращает долю теряемой энергии и

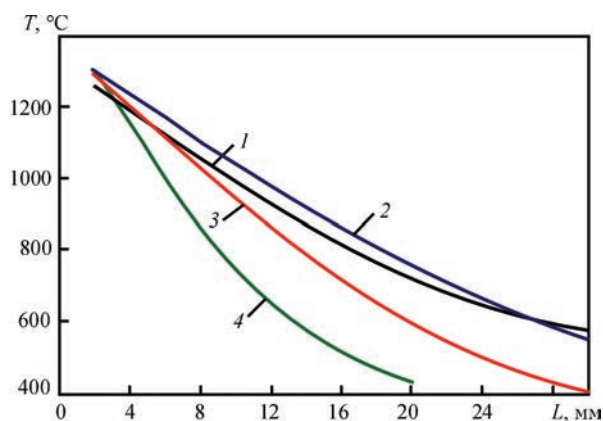


Рис. 6. Распределение температуры в ЗТВ перед осадкой при сварке рельсов Р65 на различных режимах: 1 — с предварительным подогревом ( $t_{св} = 200 \dots 250$  с); 2 — НО с программным понижением напряжения ( $t_{св} = 180 \dots 220$  с); 3 — ПО ( $t_{св} = 110 \dots 120$  с); 4 — ПО ( $t_{св} = 60 \dots 70$  с)

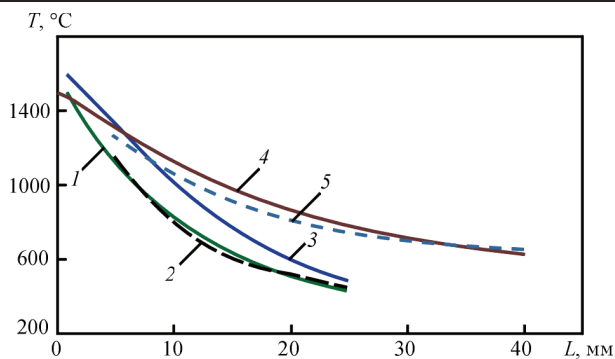


Рис. 7. Распределение температуры в ЗТВ перед осадкой при сварке рельсов Р65 с разным значением тока и длительностью оплавления: 1 — ПО при  $T = 60$  с,  $I = 370$  А (расчетное); 2 — ПО при  $T = 60$  с,  $I = 370$  А (экспериментальное); 3 — ПО при  $T = 60$  с,  $I = 450$  А (расчетное); 4 — НО при  $T = 180$  с,  $I = 170$  А (расчетное); 5 — НО при  $T = 180$  с,  $I = 170$  А (экспериментальное)

приводит к повышению КПД на всех стадиях нагрева контактов.

На рис. 7 приведены температурные поля, полученные расчетным и экспериментальным путем при различных значениях сварочного тока ( $I_{св}$ ) в процессе ПО рельсов Р65 из стали М76 и К76Ф. Программа изменения основных параметров  $U_2$ ,  $V_{п.}$  принята одинаковой, а длительность оплавления соответствует установленному квазистационарному температурному состоянию для каждого режима нагрева. Значение тока при ПО принималось большим относительно принятого при НО. Как видно из сравнения кривых, переход к пульсирующему оплавлению приводит к увеличению среднего значения сварочного тока ( $I_{св}$ ) и сокращению длительности процесса. С увеличением тока градиент температурного поля повышается, а температура приконтактных слоев, примыкающих к поверхности оплавления, возрастает. Поверхность оплавления более ровная по сравнению с НО (рис. 8). Даже при сокращении длительности нагрева в 3 раза по сравнению с НО температура приконтактных слоев, подвергающихся интенсивной деформации, остается более высокая, чем при НО (см. рис. 7). Это создает необходимые условия



Рис. 8. Поверхность оплавления торцов рельсов перед осадкой

Таблица 2. Результаты испытаний на статический изгиб рельсов из стали М76 и К76Ф при сварке НО и ПО с различным энерговоложением\*

Показатели механических испытаний	1	2	3	4
Э76Ф («Евраз», РФ)				
Разрушающая нагрузка, т	$\frac{1700...2200}{2000}$	$\frac{1750...1900}{1850}$	$\frac{2200...2400}{2250}$	$\frac{1950...2100}{1900}$
Стрела прогиба, мм	$\frac{10...30}{20}$	$\frac{12...26}{18}$	$\frac{32...40}{35}$	$\frac{20...28}{24}$
К76Ф (ПАО МК «Азовсталь», Украина)				
Разрушающая нагрузка, т	$\frac{1600...2000}{1800}$	$\frac{1750...1950}{1850}$	$\frac{2100...2400}{2250}$	$\frac{1850...2050}{1900}$
Стрела прогиба, мм	$\frac{18...30}{25}$	$\frac{21...30}{22}$	$\frac{34...50}{42}$	$\frac{25...32}{28}$

\* НО — 1; ПО — 2–4; распределение температур 1–4 см. рис. 6

для формирования качественных соединений при высоких градиентах температурного поля.

Для проверки возможностей получения качественных соединений при сварке рельсов с минимальным энерговоложением сварена партия высокопрочных рельсов М76 производства НКМЗ, а также рельсов производства Азовсталь. Для сравнения были также сварены партии рельсов М76 и КФ на режимах, принятых для НО. Принятые режимы сварки ПО этих партий обеспечили пониженное энерговоложение, характеризующееся температурными полями (см. рис. 6). Для сравнения приведены также температурные поля, соответствующие принятым режимам нагрева НО. Общая ширина зоны структурных превращений была меньшей, чем при оптимальном режиме сварки, принятом при НО, а длительность процесса оплавления сокращалась в 2...3 раза. Все партии М76 и КФ, сваренные с различным энерговоложением, испытывались на статический изгиб в соответствии с принятой методикой, а также исследовалась структура сварных соединений. Результаты испытаний приведены в табл. 2. При испытаниях партий рельсов марки сталей М76 и К76Ф, сваренных НО, результаты испытаний отличались нестабильными и низкими показателями. Уменьшение длительности оплавления с 200 до 160 с позволило улучшить структуру и повысить показатели пластичности при испытаниях отдельных образцов, но при этом значительно увеличилось количество образцов с содержанием дефектов в плоскости сварки. Показатели механических испытаний партий, сваренных ПО, соответствовали нормативным требованиям, но отличались в зависимости от энерговоложения. Наиболее высокие и стабильные показатели наблюдали в партии ПО с длительностью нагрева 60 с для рельсов М76 и 80 с для К76Ф. Главным результатом этих исследований был вывод о том, что при ПО можно варьировать энерговоложением при сварке высокопрочных рельсов в широком диапазоне, не опасаясь появления дефектов в плоскости соединения. В изломах испытываемых партий рельсов при испытаниях

с разрушением рельсов в плоскости соединения не было обнаружено каких-либо дефектов типа оксидных пленок даже при минимальной длительности сварки. Отсутствие дефектов при сварке с высокими градиентами температурных полей свидетельствует о том, что при ПО создаются более благоприятные условия для формирования соединений.

Проведенными исследованиями установлено, что при ПО максимальное значение  $\Delta_{искр}$  уменьшается в 1,5...2,0 раза, а толщина расплава  $\delta_{ж}$  более стабильна и ее минимальные значения больше, чем при НО. Необходимо также учитывать тот факт, что даже при минимальном энерговоложении температура приконтактных слоев толщиной до 3 мм близка к 1300 °С, что обеспечивает их высокую степень деформации при сварке, способствующую уделению оксидных структур. Микроструктура на различных участках ЗТВ отличалась в зависимости от величины энерговоложения. Проведенные металлографические исследования микроструктуры сваренных соединений партий рельсов позволили выявить общие особенности их формирования. Общая ширина зоны термического влияния снижается при уменьшении энерговоложения более чем в 2 раза по сравнению с принятой при НО (рис. 9, а). В зоне сварки наблюдается увеличение твердости с ее локальным понижением в центре шва и по границам зоны. Это обусловлено изменением структуры металла в зоне отпуска на ее границах ЗТВ и понижением содержания углерода в плоскости соединения (рис. 9, б). Ширина этих участков незначительная и не влияет на износостойкость поверхности головки контакта рельсов. На участках с повышенной твердостью структура сорбитообразного перлита переходит на отдельных участках в бейнитную структуру, такие структуры формируются на режимах сварки менее 40 с. При максимальной длительности оплавления центра шва в плоскости соединения наблюдается формирование по границам зерен включений свободного феррита (рис. 10, б). Отсутствие дефектов при сварке с вы-

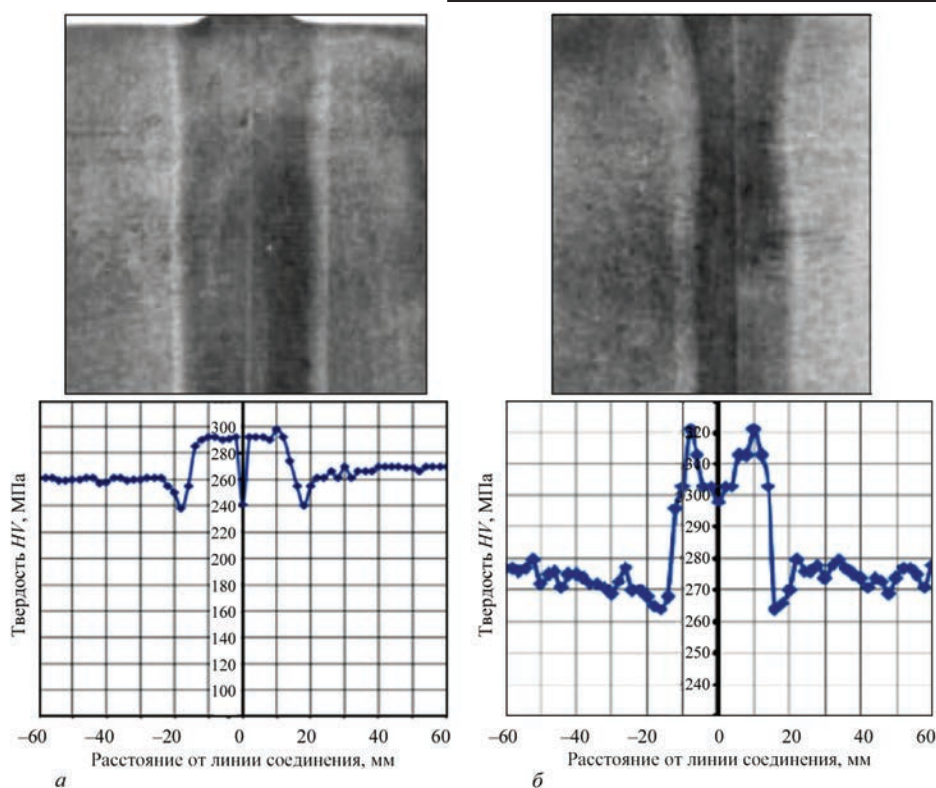


Рис. 9. Макрошлифы при оплавлении сварных соединений рельсов М76, сваренных на НО (а) и ПО (б)

сокими градиентами температурных полей свидетельствует о том, что при ПО выбор оптимальной величины энергозатрат может определяться исходя из условий получения оптимальной структуры в ЗТВ.

В последнее десятилетие на железных дорогах многих стран мира, в том числе Украины, началось применение высокопрочных рельсов эвтектоидного и заэвтектоидного состава. Контактная сварка рельсов выполняется с использованием стационарных и мобильных машин конструкции ИЭС, которые экспортируются во многие страны мира. Сотрудники ИЭС принимали участие в разработках технологий сварки рельсов различного производства, в том числе высокопрочных, накоплен значительный опыт сварки таких рельсов различных производителей.

Для сварки высокопрочных рельсов с эвтектоидным и заэвтектоидным содержанием углерода используются программы сварки ПО, приведенные на рис. 11. Программы изменения основных параметров приняты как базовые и сертифицированы, при этом регулирование энергозатрат производится за счет изменения длительности оплавления и значения сварочного тока. Поскольку программы ориентированы на использование в машинах конструкции ИЭС, их адаптация к возможностям сварочного оборудования (сопротивление  $Z_{к.з}$  и мощность сварочного контура, быстродействие привода) сведена к минимуму. Базовыми элементами, определяющими механи-

ческие свойства металла во всех партиях рельсов, являются железо, углерод, марганец, кремний. В качестве легирующих элементов использованы ванадий, титан, ниобий, азот, хром. Перечисленные элементы упрочняют металл, в том числе карбидами и карбонитридами. Базовой микроструктурой для всех исследуемых партий рельсов является сорбит закалки, отличающейся в различных рельсах только степенью дисперсности. Стали R260 и R350HT отличаются повышенным содержанием марганца, что улучшает их прокаливаемость. При изменении энергозатрат в достаточно больших пределах ( $t_{св} = 40 \dots 80$  с) формирование дефектов в плоскости сварки не наблюдалось, но выявлено значительное влияние изменения энергозатрат на структурные превращения в ЗТВ. При сварке сталей R350HT исследуемых партий рельсов на границе зоны термического влияния и в центральной части зоны соединения наблюдается снижение твердости. Это обусловлено нагревом металла ЗТВ до температуры высокого отпуска и снижением содержания углерода в центральной части шва в результате нагрева металла до температуры плавления. При уменьшении энергозатрат снижение твердости проявляется в меньшей степени, а ширина участков разупрочнения уменьшается. Такое влияние проявляется на всех исследуемых рельсах, имеющих твердость на уровне 380...400 МПа. Совершенно по другому снижению энергозатрат влияет на структуру ЗТВ сталей R260. Твердость при уменьшении

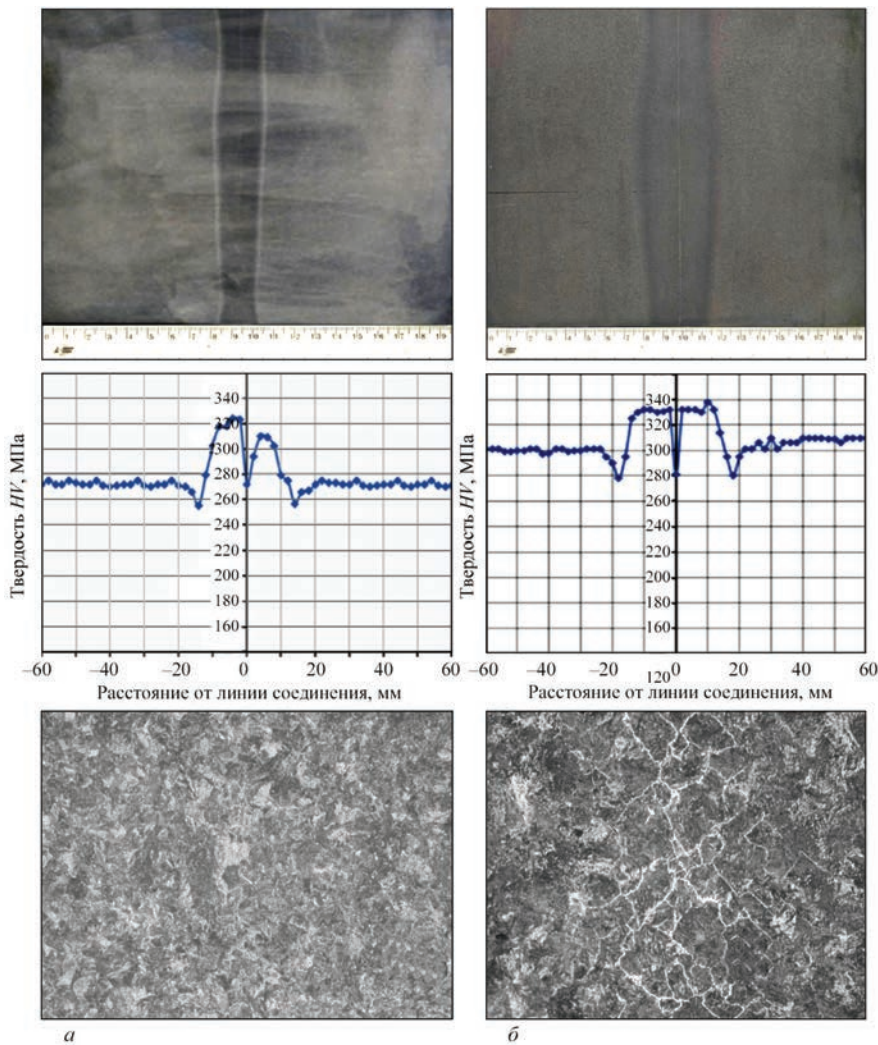


Рис. 10. Макро-, микроструктура ( $\times 100$ ) и распределение твердости ( $HV$ ) сварных соединений рельсов марки R260 с разным тепловложением: *a* —  $T_{св} = 65 \dots 75$  с; *б* —  $90 \dots 100$  с

энерговложения резко увеличивается по всей ширине ЗТВ, а на ее границе и в центре разупрочнение проявляется, но в меньшей степени. Это объясняется тем, что сталь R260 с эвтектоидным содержанием углерода упрочняется (при изготовлении) в меньшей степени, не достигая предельно возможного значения для получения более высоких показателей пластичности. При сварке происходит повторная закалка с повышением прочности и твердости. По техническим условиям,

регламентирующим требования к сварным соединениям, необходимо, чтобы при сварке сталей указанного класса отклонения значений твердости в ЗТВ не были выше  $+60 HV$  и ниже  $-30 HV$  твердости основного металла. Это усложняет определение оптимальных режимов сварки, особенно для рельсов R260. Распределение твердости в ЗТВ при сварке рельсов R260 с различным энерговложением приведено на рис. 10. Чтобы получить требуемую твердость, необходимо более точно дозировать энерговложение при сварке (см. рис. 10, *a*). Распределение твердости в сварных швах стали R260 при изменении энерговложения отличается от оптимального значения, предусмотренного программой. В образцах стали R260 ширина ЗТВ определяется расстоянием между границами участков высокого отпуска. Структура этих участков представляет собой сорбит отпуска, в центре шва структуры первичного аустенита с баллом 3-4, по границам этих зерен выявляются участки свободного феррита. С увеличением энерговложения их толщина возрастает, что сопровождается снижением твердости в центре шва и

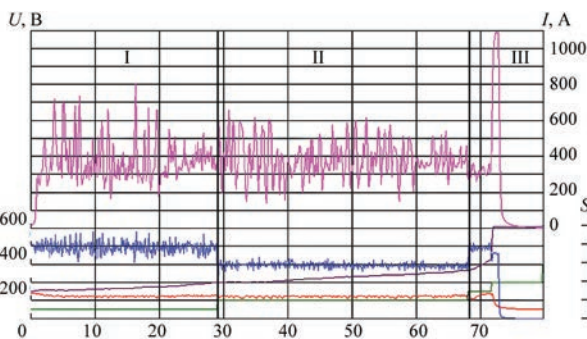


Рис. 11. Базовая программа изменения основных параметров при сварке ПО различных рельсов (I, II, III — периоды программы)



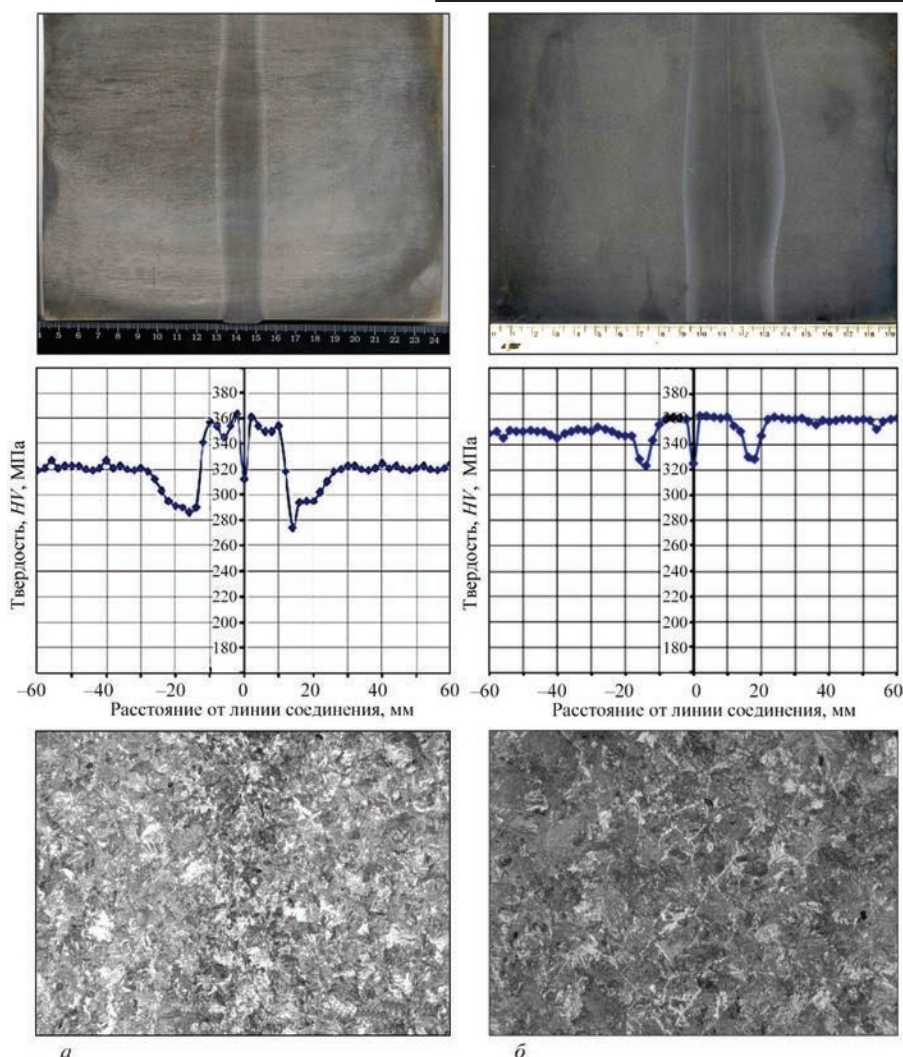


Рис. 12. Макро-, микроструктура ( $\times 100$ ) и распределение твердости ( $HV$ ) в сварном соединении рельсов марки R350HT с разным тепловложением:  $a$  —  $T_{св} = 65 \dots 75$  с;  $b$  —  $90 \dots 100$  с

механических свойств при испытаниях. Изменение длительности энерговложения в относительно небольших пределах (10 с) приводит к ощутимым изменениям твердости в ЗТВ (см. рис. 10). В образцах стали R350HT (рис. 12) ширина ЗТВ больше. По ее границам и в центре наблюдается снижение твердости, что обусловлено разупрочнением по границам и формированием в центре структуры перлитно-сорбитной с выделениями свободного феррита по границам зерен первичного аустенита. В отличие от стали R260 твердость в ЗТВ при изменении энерговложения повышается незначительно и сохраняется на уровне основного металла. В центре степень снижения твердости определяется количеством свободного феррита. В рассматриваемых образцах феррит не формируется в виде сплошной сетки вокруг зерен первичного аустенита, что гарантирует высокий уровень показаний при испытаниях на изгиб.

Стали ARIEL13610SP и ARIEL136HE370 выделяются своими высокими механическими свойствами и износостойкостью [10].

В основном металле этих сталей (рис. 13) на границе первичных аустенитных зерен доэвтектоидного феррита присутствуют выделения карбидной фазы. При размере колоний сорбита  $10 \dots 15$  мм толщина выделений карбидной фазы составляет десятые доли микрон. Присутствие этой фазы повышает износостойкость [11]. В сварных соединениях этих сталей, выполненных на оптимальных режимах, карбидная фаза отсутствует, а по линии соединения как в других приведенных образцах высокопрочных сталей, твердость понижается по сравнению с уровнем показателей основного металла. Степень снижения определяется величиной энерговложения. При сварке таких сталей на принятом режиме ширина зоны нагрева больше, чем в стали R350HT и составляет (около 30 мм), что позволяет выдерживать требуемые допуски на отклонения величины твердости в сварных соединениях.

Сварка рельсов перечисленных сталей выполнялась на мобильных машинах K922 конструкции ИЭС, которые используются на железных доро-

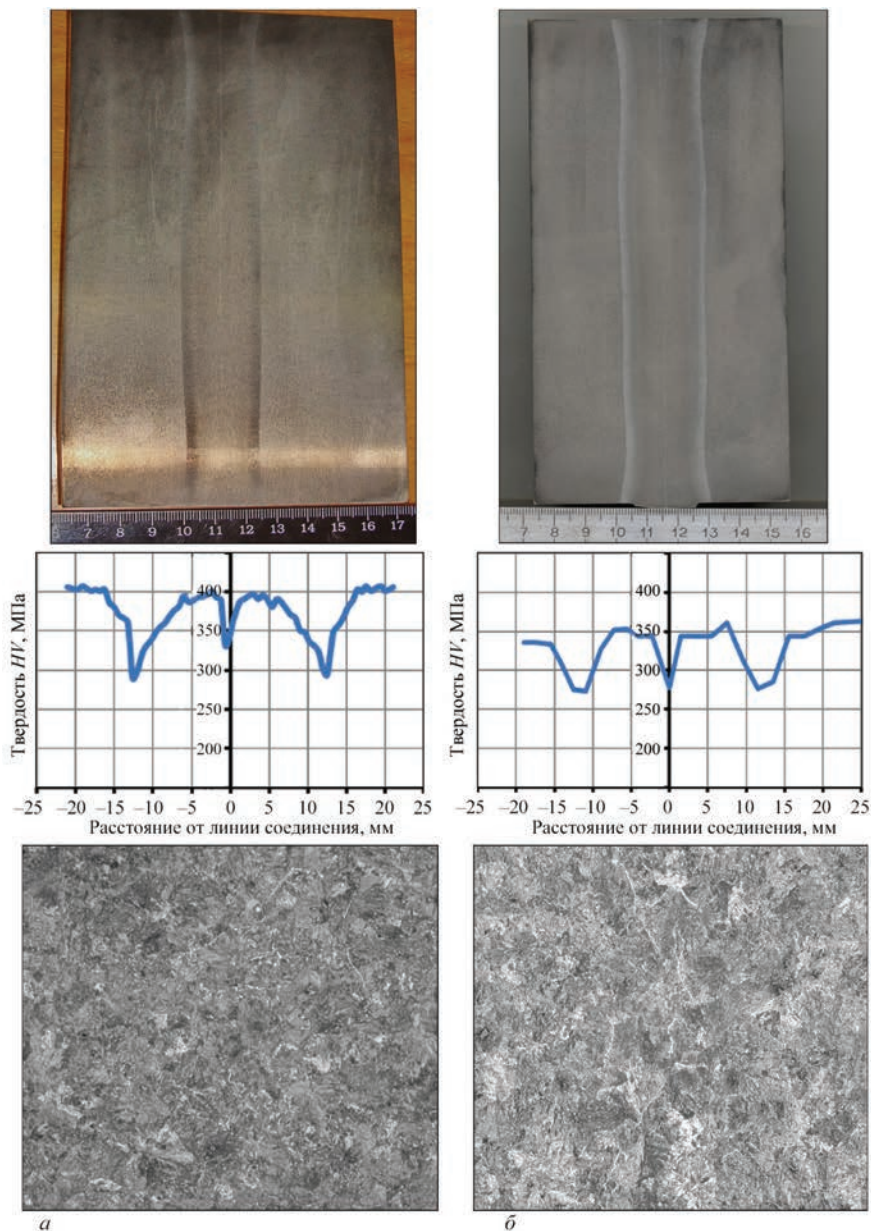


Рис. 13. Макро-, микроструктура ( $\times 100$ ) зоны соединения и распределение твердости ( $HV$ ) в сварном соединении рельсов марки AREAL 136 10 SP (а) и AREAL 136 HE370 (б)

гах Украины и других стран. В основу технологии сварки ПО была положена программа энерговложения (см. рис. 6). Основные ее параметры: величина напряжения холостого хода  $U_2$ , усилия осадки приняты одинаковыми для рельсов всех партий. Регулировалось энерговложение за счет изменения длительности оплавления и значения сварочного тока  $I_{св}$  в период II, предусмотренный программой. Установлены оптимальные режимы сварки для каждой партии рельсов и сварены контрольные партии в количестве 10 стыков, которые подвергнуты испытаниям в соответствии с требованиями стандарта ЕС и Украины. Результаты испытаний приведены в табл. 3. Все сварные соединения контрольных партий удовлетворяют требованиям упомянутых стандартов не только по результатам механических испытаний, но так-

же при проверках качества соединений с использованием неразрушающих видов контроля. Рельсы типа R260 и R350 были испытаны на усталость и выдержали 5 млн циклов без разрушения. Следует отметить, что все сварные соединения контрольных партий не подвергались после сварки термической обработке. В процессе исследований и накопленного опыта производственного использования разработанных технологий было установлено, что при сварке на режимах, отличающихся низким энерговложением, необходимо более жесткое ограничение допустимых отклонений установленных параметров сварки, особенно влияющих на величину энерговложения. Поэтому реализация технологии сварки ПО в производственных условиях стала возможной после разработки в ИЭС новых систем и алгоритмов автоматическо-

го управления процессом сварки. Вместо использования жестких программ изменения основных параметров, принятых при сварке стандартных рельсов, разработана самонастраивающаяся система регулирования параметрами (рис. 14). Система позволяет в реальных производственных условиях поддерживать оптимальный режим устойчивого оплавления и нагрева, в значительной степени независимо от изменения условий эксплуатации (колебания напряжения сети, изменения температуры окружающей среды по сравнению с расчетной — 20 °С).

Отличительной особенностью разработанных технологий является наличие в системах управления обратных связей по основным параметрам, автоматически корректирующих их величину, заданную программой, при отклонении от заданных значений. В процессе оплавления проводятся кратковременные корректировки заданных значений с целью стабилизации их заданных средних значений. Разработаны алгоритмы управления этим процессом для каждого из параметров, например, значение сварочного тока и энергия регулируются скоростью подачи таким образом, чтобы их средние значения поддерживались на заданном уровне. При этом учитывается уровень напряжения, подводимого к свариваемым деталям, сопротивление сварочной цепи и усилие, развиваемое гидроприводом машины (при сварке с натяжением). Подобные алгоритмы многофакторного регулирования используются также по другим параметрам оплавления. В ряде случаев накопление кратковременных изменений заданных программой величин параметров могут привести к корректировке самой программы, например, увеличению длительности оплавления в каждом ее

Таблица 3. Результаты испытаний рельсов на статический изгиб при сварке непрерывным ПО (период II)

Марка стали	Разрушающая нагрузка, т	Стрела прогиба, мм
M76	<u>1900...2200</u> 2150	<u>34...65</u> 48
K76Ф	<u>2100...2400</u> 2250	<u>34...50</u> 42
Э76Ф	<u>2300...2600</u> 2400	<u>32...42</u> 35
R260	<u>2250...2500</u> 2400	<u>37...50</u> 48
R350HT	<u>2000...2200</u> 2100	<u>34...50</u> 40
R350HT	<u>2870...3100</u> 3000	<u>58...66</u> 62
BC-350Я	<u>2300...2700</u> 2500	<u>30...50</u> 40
AREAL 136 10 SP	<u>2200...2400</u> 2300	<u>35...45</u> 40
AREAL 136 HE370	<u>2200...2550</u> 2300	<u>34...45</u> 38

периоде. Если эти изменения не превышают допустимых, они приемлемы. Определены алгоритмы оценки влияния изменений на качество соединений. Они позволяют расширить диапазон допустимых отклонений и обеспечивают высокую воспроизводимость заданных программ сварки.

Возможности автоматической системы управления параметрами сварки не беспредельны и не могут предотвращать грубые нарушения условий эксплуатации сварочного оборудования.

Регистрация программ изменения основных параметров при сварке стыка дает возможность эффективно использовать разработанные алгорит-



Рис. 14. Система автоматического многофакторного регулирования параметрами сварочного процесса при сварке высокопрочных рельсов марки K76Ф

мы для оценки качества соединения по величине отклонений в режиме реального времени работ. На каждый сваренный стык компьютерная система управления сварочной машины выдает паспорт, где в текстовом и графическом виде зарегистрировано изменение основных параметров, а также их реальное отклонение от оптимальных значений. Разработаны алгоритмы контроля, на основе которых система выдает оценку качества сварочного стыка в режиме реального времени и заносит в паспорт. Результаты контроля выдаются сразу после выполнения сварки на дисплее машины для информации оператору и одновременно, в диагностический центр, где производится более тщательный анализ с учетом результатов разрушающего контроля стыков и УЗК. Сотрудники ИЭС совместно с «НИКТИ» ЧАО «Укрзалізниця» обработали большой объем (несколько десятков тысяч сваренных стыков). На основе этой информации были уточнены алгоритмы оценки качества соединений при операционном контроле и нормативные документы, регламентирующие оценку качества [11].

Многофакторная система управления сварочными машинами (см рис. 14) используется в стационарных и мобильных машинах конструкции ИЭС. В варианте исполнения для мобильных машин она совмещена с приводом, обеспечивающим сварку рельсов с натяжением, где используются дополнительные обратные связи, обеспечивающие выполнение программ перемещения свариваемых рельсов, совмещенных с их натяжением.

Эти операции управляются общим компьютером, выполняющим одновременно программы сварки, операционного контроля и натяжения рельсов мобильными машинами.

**Сварка длинномерных рельсов с натяжением.** При ремонте бесстыковых железнодорожных путей после вырезки дефектных или изношенных участков рельсов, а также при реконструкции путей, необходимо сваривать между собой длинномерные рельсовые плети, закрепленные на шпалах. Для этого вместо вырезанного участка рельсов между концами соединяемых плетей устанавливается рельс-вставка, которая приваривается к торцам рельсовых плетей [12]. При сварке второго замыкающего стыка в соответствии с нормативами необходимо восстановить температурно-напряженное состояние на участке, где выполнялась сварка. Это достигается регулированием длины рельса-вставки за счет ее удлинения или укорочения на величину  $L_t = f(\Delta T)$ , где  $\Delta T = \theta_3 - \theta_{св}$  ( $\theta_3$  — температура закрепления свариваемых пластин;  $\theta_{св}$  — температура на момент проведения сварки рельсов). Для железных дорог Украины принята температура закрепления рельсов  $\theta_3 = 30$  °С. Боль-

шая часть таких работ производится при температурах окружающей среды  $\theta_{св}$  ( $\theta_{св} < \theta_3$ ), соответственно, необходимо при этом укорачивать длину рельса-вставки. Чтобы получить требуемое приращение  $L_t$ , а также обеспечить припуски на сварку, вставку и часть рельсового пути освобожденной плети изгибают. После сварки исходное положение плети восстанавливается. Эта операция весьма трудоемкая, выполняется с использованием комплекса механизмов (подъемники, натяжители) и большого количества вспомогательных рабочих. Движение железнодорожного транспорта на период ремонта прекращается, что связано с большими материальными потерями. Специалистами ИЭС совместно с фирмами США, занимающимися реконструкцией и ремонтом железных дорог, разработана технология и оборудование, позволяющие совмещать сварку с восстановлением температурно-напряженного состояния пути. В ее основу положена идея создания в процессе сварки в соединяемых рельсовых плетях такого уровня растягивающих напряжений, при котором в заданном диапазоне температур ( $-40...+50$  °С) исключается возможность формирования напряжений сжатия. Проведенные расчеты показали, что для решения этой задачи необходимо, чтобы уровень растягивающих напряжений не достигал предельных значений, превышающих 16 % предела текучести рельсовой стали, что допустимо. Для выполнения натяжения предложено использовать гидпривод контактных сварочных машин конструкции ИЭС, осуществляющий оплавление и осадку. Процесс контактной сварки предложено выполнять с использованием программ, предусматривающих два этапа. На первом этапе обеспечивается перемещение конца свариваемой вставки с большой скоростью на величину установленного зазора  $\Delta_3$ . Длительность этого этапа не превышает нескольких секунд. После соприкосновения торцов рельсов и возбуждения оплавления выполняется программа сварки рельсов, принятая для рельсов данного типа с одновременным их натяжением. При сварке происходит укорочение рельсов и продолжается их натяг. После окончания сварки обеспечивается требуемое укорочение  $L_t = L_{свt} + \Delta_3$ , где  $L_{свt}$  — укорочение рельса при сварке ( $L_{свt} = l_{оплав} + l_{осад}$ ),  $\Delta_3$  — зазор между торцами рельсов, установленный до сварки. Регулирование величины натяжения осуществляется установкой зазора  $\Delta_3$ . В рассмотренном варианте рельсы, примыкающие к сварочному соединению, не растягиваются и весь натяг  $L_t$  осуществляется за счет удлинения рельса-вставки. Во многих случаях усилия, необходимого для натяжения рельса-вставки стандартной длины 24 м не удастся обеспечить. В этом случае требуемая величина натяжения обеспечивается за счет допол-

нительной расшивки от шпал концов рельсов, примыкающих к сварному шву на величину  $L_m$ . Общее усилие  $L_t$  формируется за счет выбора величины  $L_m$  и  $\Delta_3$ , т. е.  $L_t = L_m + \Delta_3 + L_{св}$ .

При сварке рельсов с натяжением используется технология сварки рельсов ПО. Программы управления сварочным процессом сохраняются такие же, как при сварке отдельных рельсов без натяжения с использованием общих систем автоматического управления параметрами оплавления и введением дополнительных обратных связей параметров, управляющих энерговыделением. Изменение усилий напряжения при сварке оказывает влияние на работу гидропривода сварочных машин. Кроме данных, определяющих параметры режимов сварки, понадобилась разработка дополнительных систем автоматического управления, стабилизирующих энерговыделение.

При сварке с натяжением в компьютеризированную систему управления вводятся данные о температуре рельсов, при которой производится их сварка:  $\theta_{св}$ , суммарная длина участков плетей, освобожденных от креплений ( $L_m$ ), длина рельса-вставки, а также величина зазора между рельсовой плетью и вставкой  $\Delta_3$ . Кроме этого, отдельно вводится величина температуры закрепления на свариваемом участке  $\theta_3$ .

При сварке с натягом после окончания сварки металл сварного шва нагрет до температуры 1100...1200 °С и удерживается в сжатом состоянии приводом сварочной машины. При этом системами контроля, установленными на машине, контролируется длительность остывания сварного шва до температуры 100...200 °С. Одновременно автоматически производится срезка грата, образующегося при сварке. После выполнения этих операций рельсы разжимают и сварочная машина снимается со стыка. Длительность сварки рельсов не превышает 2 мин, а вспомогательные операции в значительной степени зависят от выбранной схемы организации работ при сварке. При выполнении натяжения по варианту, когда используется подготовка рельс-вставки заданной длины без расшивки примыкающих участков плетей, обеспечивается максимальная производительность рельсосварочных комплексов, а при использовании варианта, требующего расшивки определенного участка пути, длительность вспомогательных операций возрастает и зависит от длины участка, освобождаемого от шпал.

На рис. 15 приведена зависимость усилия (1) и величины хода подвижного зажима сварочной машины (2), необходимых для осуществления натяга рельсов, соответствующего  $\Delta T = 30$  °С при различной длине их участка, освобожденного от шпал. Если натяг осуществляется только за счет

рельса-вставки длиной 24 м, необходимо усилие натяжения 100 т и ход подвижного зажима около 150 мм. При условии освобождения концов рельсов от креплений на различную длину, усилие значительно снижается. Увеличение хода подвижного зажима машины оказывает значительно меньшее влияние на вес рельсосварочной машины, чем влияние усилия осадки. Поэтому рациональное соотношение этих параметров машин определяет их возможности при эксплуатации в различных условиях. Имеющиеся на железных дорогах рельсосварочные машины предыдущих поколений типа К355, К900 не могут быть использованы для сварки с натяжением, прежде всего, в связи с недостаточным усилием осадки и ограниченным ходом подвижных зажимов. Кроме этого, при разработке новых поколений мобильных рельсосварочных машин для сварки с натяжением потребовалось существенное изменение их основных узлов, систем гидроэлектроуправления, конструкции привода сварочного контура и гратоснимателя.

В ИЭС в течение последних лет разработано несколько поколений машин для контактной сварки с натяжением. В отличие от машин предыдущих поколений в них применен ряд новых решений, а именно:

- машины имеют усилия осадки и, соответственно, зажатия в 2...3 раза большие, усилия осадки и зажимы с увеличением хода перемещения подвижного зажатия;
- в машинах используется многофакторная система управления основными параметрами процессом сварки, обеспечивающая стабильное воспроизведение заданных программ сварки независимо от изменения усилий натяжения;
- сварочный контур машин, несмотря на увеличение размеров силового привода подачи механической части, обеспечивает требуемый минимальный уровень  $Z_{к.з}$ ;

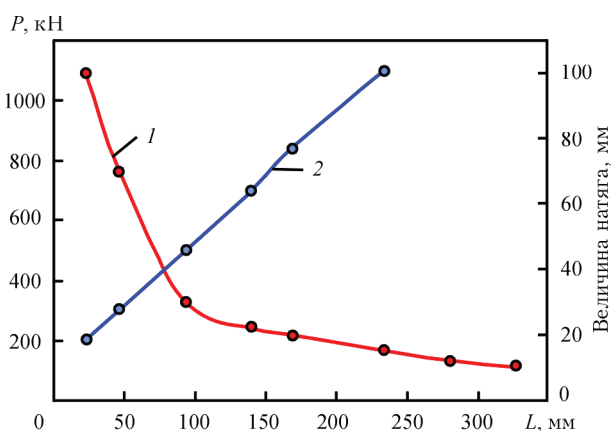


Рис. 15. Зависимость усилий натяга (1) и величины натяжения (2) хода подвижного зажима машины от длины участка расшивки крепления рельсов на шпалах при  $\Delta T = 30$  °С

Таблица 4. Технические характеристики стационарных и мобильных рельсосварочных машин, разработанных в ИЭС им. Е. О. Патона и изготавливаемых ПрАО «КЗЭСО»

Технические параметры	Типы машин ОАО «КЗЭСО»									
	К900	К920	К921	К922-1	К930	К950	К945	К960-1	К1045	К1000
Номинальное напряжение питающей сети, В	380	380	380	380	380	380	380	380	380	380
Наибольший вторичный ток, не менее кА	60	67	67	67	67	67	67	67	60	84
Номинальная мощность, (ПВ 50%), кВ·А	150	211	236	210	210	210	210	210	150	300
Усилие осадки, кН	450	1000	1500	1200	1200	1200	1200	2000	600	900
Усилие зажатия, кН	1350	2500	2900	2900	2900	2900	2900	4650	1500	2000
Ход подвижной колонны машины, мм	70	100	150	100	200	250	400	280	100	100
Масса машины, кг	2700	3000	4100	3450	3600	3650	3700	5670	3500	8800

– срезка грата при сварке производится встроенным в корпус механизмом гратоснимателя, которая контролируется в зажатом состоянии до полного основания стыка. Это исключает возможность разрыва нагретого стыка при разжатии машины.

Разработанное новое поколение рельсосварочных машин позволяет выполнять сварку длинномерных рельсовых плетей, совмещенную с их натяжением. Технические характеристики машин приведены в табл. 4. Машины отличаются повышенным усилием осадки, превышающим в 2...3 раза аналогичные показатели машин предыдущих поколений. Кроме этого привод перемещения имеет увеличенный в 2...4 раза ход подвижной части машины с учетом различных величин натяга при сварке.

Машины обеспечивают в полной мере различные процессы ПО, адаптированного к специфике нагружений привода оплавлений, при выполнении пульсирующего процесса перемещения свариваемых деталей в сочетании с их натягом. Привод отличается высоким быстродействием, обеспечивающим изменение величины искрового зазора с точностью до десятых долей миллиметров. С увеличением усилия осадки и зажатия вес машин увеличивается, что определяет конструкцию

вспомогательного оборудования, используемого при контактной сварке рельсов. Энергетическая часть передвижных комплексов определяется мощностью дизель-генераторов. Она остается такой же, как для предыдущих поколений машин 250...300 кВ·А. С увеличением веса сварочных машин требуются более мощные подъемные средства комплексов, что снижает их мобильность. За время использования машин К900 предыдущих поколений изготовлено большое количество таких комплексов в разных странах. Поэтому появился запрос на контактные машины для сварки с натяжением, имеющих меньший вес, адаптированных к имеющимся передвижным рельсосварочным комплексам предыдущих выпусков.

В полной мере преимущества контактной сварки с натяжением реализованы на машинах К921 (рис. 16), разработанных ИЭС. Усилие осадки, развиваемое приводом машины 150 т, позволяет осуществить сварку с натяжением при реконструкции железнодорожных путей с переводом их на скоростной режим работы. При сварке освобождаются примыкающие к сварному стыку участки плетей не более 15...20 м. Машины К921 используются в США, где сварено более 10 тыс. км скоростных путей с использованием таких машин. Машины К922 (рис. 17), разработанные в ИЭС в



Рис. 16. Внешний вид машины К921



Рис. 17. Внешний вид машины К922

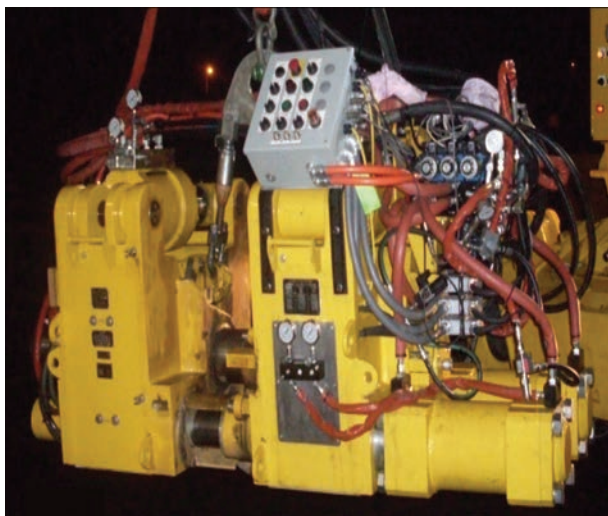


Рис. 18. Внешний вид машина K945

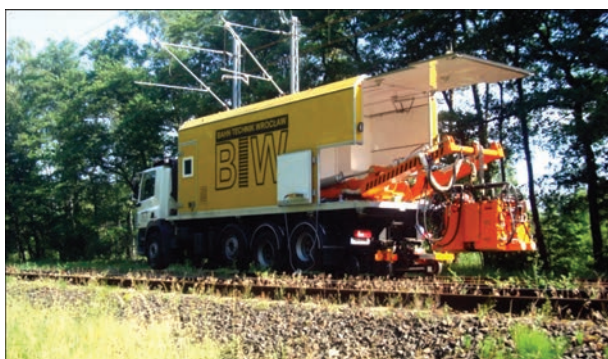


Рис. 19. Мобильный рельсосварочный комплекс КСМ 007 со сварочной головкой K922-1 на базе автомобиля Вольво



Рис. 20. Мобильный рельсосварочный комплекс КРС-1 со сварочной головкой K922-1



Рис. 21. Мобильный рельсосварочный комплекс (США)



Рис. 22. Мобильный рельсосварочный комплекс (Великобритания)

соответствии с лицензионными соглашениями, адаптированы к использованию в уже эксплуатируемых комплексах во многих странах мира, применяются на различных передвижных комплексах, оснащенных контактными машинами K922 производства КЗЭСО. Около 20 таких машин работают на железных дорогах Украины. Удачное совмещение усилия осадки (до 120 т) и хода подвижного зажима (150 м) позволяет минимизировать длину участка, освобожденного от шпал, и позволяет применять эти машины в различных условиях. Одновременно разрабатываются машины K920, K930 с усилием осадки 100 т, при этом они адаптированы к имеющимся во многих странах мира передвижным рельсосварочным комплексам для машин предыдущего поколения (K900).

В соответствии с лицензионным соглашением с фирмой Холланд ИЭС разработаны машины K930 и K945 (рис. 18), которые имеют увеличенный ход подвижного зажима до 450 м при усилии осадки 120 т. Это позволяет сваривать длиномерные рельсовые плети большой длины при реконструкции железнодорожных путей. Соответственно разработаны передвижные комплексы для работы с такими машинами. Минимизация веса и расширенные возможности привода осадки позволили создать высокоманевренные передвижные комплексы с использованием машин K945 (рис. 19–22). Десять таких комплексов работает с 2014 г. на железных дорогах Великобритании. Они используют машины K945, разработанные в ИЭС и изготовленные на КЗЭСО.

**Заключение.** Многолетние разработки ИЭС технологий и оборудования для контактной сварки рельсов внесли весомый вклад в развитие железных дорог стран бывшего СНГ и мира. По данным завода КЗЭСО в настоящее время эксплуатируется более 2500 машин, разработанных ИЭС, изготовленных и поставленных заводом в соответствии с лицензионными соглашениями и контрактами в различные страны мира. Только за последние 5 лет такие рельсосварочные машины поставлены по экспорту в США, Канаду, Китай, Францию, Иран, Малайзию, Австрию, Марокко,

Польшу и другие страны, что составляет 60 % мирового парка контактных рельсосварочных машин и 90 % мобильных рельсосварочных машин [13]. Их применение способствовало ускорению строительства и реконструкций железных дорог, в том числе скоростных магистралей. Только на железных дорогах Китая используется более 100 машин К922, что способствовало ускорению там строительства скоростных магистралей. На железных дорогах США используются машины К900, К920, К930, К922, К921.

В ИЭС продолжают развиваться разработки технологий и оборудования для контактной сварки высокопрочных рельсов, запросы на которые непрерывно поступают в институт. Это обусловлено повышением грузонапряженности железнодорожных магистралей и необходимостью повышения ресурса эксплуатируемых рельсов. Металлургическая промышленность начинает осваивать выпуск высокопрочных рельсов с гарантируемым ресурсом эксплуатации в 2...3 раза превышающим средний достигнутый уровень износостойкости. Имеющийся опыт показывает, что рельсы такого качества относятся к трудносвариваемым. Необходимы новые технологии их сварки и системы автоматического управления процессом сварки.

Наряду с разработками новых технологий в ИЭС продолжают развиваться разработки нового оборудования для сварки рельсов в пути и стационарных условиях.

В соответствии с лицензионным соглашением с фирмой Progress Rail, США, разработан и изготовлен пилотный образец машины К960, с усилением осадки 200 т, которая проходит испытания, а также машины К963 для сварки рельсов с железнодорожными крестовинами. Машина К960 характеризуется уникальными возможностями для дальнейшего развития технологий сварки с натягом, а новая машина К963 позволяет впервые контактным способом вваривать рельсы с окончаниями железнодорожных крестовин в пути.

Весьма перспективным представляется дальнейшее совершенствование системы удаленного мониторинга качества соединений рельсов в режиме реального времени. Использование современных средств информационных технологий открывает широкие возможности для дальнейшего развития эффективного вида контроля качества сварных соединений рельсов. Разработки новых технологий, систем автоматического управления процессом контактной сварки рельсов продолжают развиваться.

### Список литературы

- (1980) Flash welding. *Welding Handbook*. Volume three Seventh Edition, pp. 60–65.
- Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К. (1969) *Способ контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением*. СССР А. с. 226745, В23К 11/04, Великобритания Пат. GB11623073, Франция Пат. FR1517114, Швейцария Пат. SE322003, Италия Пат. IT796912.
- Патон Б. Е., Лебедев В. К. (1969) *Электрооборудование для контактной сварки*. Москва, Машиностроение, сс. 40–68.
- Кучук-Яценко С. И., Кривенко В. Г., Богорский М. В. (1974) *Способ управления процессом контактной стыковой сварки оплавлением*. СССР А. с. 542604, В23К 11.
- Патон Б. Е., Сахарнов В. А., Лебедев В. К., Кучук-Яценко С. И. (1967) *Машина для контактной стыковой сварки*. СССР А. с. 201561, В23К 11, США Пат. US3349216, Великобритания Пат. GB1056812, Франция Пат. FR1384943, ФРГ Пат. DE1465942, Финляндия Пат. FI49917.
- Кучук-Яценко С. И., Швеи В. И., Дидковский А. В., Антипин Е. В., Капитанчук В. Л. (2013) Дефекты соединений высокопрочных рельсов, выполненных контактной стыковой сваркой оплавлением. *Автоматическая сварка*, **9**, 3–9.
- Кучук-Яценко С. И. (1992) *Контактная стыковая сварка оплавлением*. Лебедев В. К. (ред.). Киев, Наукова думка.
- Кучук-Яценко С. И., Дідковський О. В., Богорський М. В., Кривенко В. Г., Горішняков О. І., Кривонос В. П. (2002) *Спосіб контактного стикового зварювання оплавленням*. Україна Пат. 46820 6В23К11/04, С2, РФ Пат. № 2222415 от 2003, США Пат. US № 6.294.752 от 2001, Великобритания Пат. GB235725.9А от 20.06.01, КНР Пат. ZL00101672/5 от 2004.
- Кучук-Яценко С. И., Миленин А. С., Великоиваненко Е. А. и др. (2018) Математическое моделирование процесса нагрева металла при контактной стыковой сварке непрерывным оплавлением. *Автоматическая сварка*, **10**, 3–10.
- Kimura Tatsumi, Takemasa Mineyasu, Honjo Minoru (2011) Development of SP3 Rail with High Wear Resistance and Rolling Contact Fatigue Resistance for Heavy Haul Railways. *Jfe Technical Report*, **16**.
- (2016) ТУ У 27.1-40081293-002:2016. ТУ У 27.1-40081293-002:2016. *Рейки нові зварені для залізниць*. «Дніпропетровське НКТБ КГ» філії «НДКТБ» ПАТ «Укрзалізниця».
- Кучук-Яценко С. И., Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф. и др. (2004) Исследование остаточных напряжений в сварочных соединениях рельсов, полученных при контактной стыковой сварке оплавлением. *Автоматическая сварка*, **9**(617), 33–36.
- Мазур М. А. (2018) *Очерки истории Патоновской научной школы*. Харьков.

### References

- (1980) *Welding handbook*. Vol. 3: Flash welding. 7th Ed., AWS, 60-65.
- Kuchuk-Yatsenko, S.I., Lebedev, V.K. (1969) *Continuous flash-butt welding. USSR author's cert.* 226745, Int. Cl. B23K 11/04. Pat. GB11623073, Great Britain; Pat. FR1517114, France; Pat. SE322003, Switzerland; Pat. IT796912, Italy.
- Paton, B.E., Lebedev, V.K. (1969) *Electric equipment for resistance welding*. Moscow, Mashinostroenie, pp. 40-68 [in Russian].
- Kuchuk-Yatsenko, S.I., Krivenko, V.G., Bogorsky, M.V. (1974) *Method of control of flash-butt welding process. USSR author's cert.* 542604, Int. Cl. B23K 11 [in Russian].
- Paton, B.E., Sakharnov, V.A., Lebedev, V.K., Kuchuk-Yatsenko, S.I. (1967) *Machine for flash-butt welding. USSR author's cert.* 201561, Int. Cl. B23K 11, Pat. US3349216, USA; Pat. GB1056812, Great Britain; Pat. FR1384943, France; Pat. DE1465942, FRG; Pat. FI49917, Finland.
- Kuchuk-Yatsenko, S.I., Shvets, V.I., Didkovsky, A.V et al. (2013) Defects of joints of high-strength rails produced using flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 2-8.
- Kuchuk-Yatsenko, S.I. (1992) *Flash-butt welding*. Ed. by V.K. Lebedev. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].



8. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Didkovsky, O.V., Bogorsky, M.V. et al. (2002) *Flash-butt welding method*. Pat. 46820, Ukraine, Int. Cl. 6B23K11/04, C2, Pat. 2222415, RF (2003); Pat. 6.294.752, USA (20.06.01); Pat. ZL001016772/5 (2004), PRC.
9. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Milenin, A.S., Velikoivanenko, E.A. et al. (2018) Mathematical modeling of metal heating process in continuous flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, **10**.
10. Kimura Tatsumi, Takemasa Mineyasu, Honjo Minoru (2011) Development of SP3 rail with high wear resistance and rolling contact fatigue resistance for heavy haul railways. *Jfe Technical Report*, **16**.
11. (2016) TU U 27.1-40081293-002:2016. *New welded rails for railways*. Dnipropetrovske NKTB KG, Ukrzaliznytsya [in Ukrainian].
12. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Velikoivanenko, E.A., Rozyinka, G.F. et al. (2004) Investigation of residual stresses in welded joints of rails produced by flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 32-35.
13. Mazur, M.A. (2018) *Historical outlines of Paton scientific school*. Kharkov [in Russian].

## ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ РЕЙОК: 60 РОКІВ БЕЗПЕРЕРВНИХ ІННОВАЦІЙ

**С. І. КУЧУК-ЯЦЕНКО**

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

У статті узагальнено 60-річний досвід Інституту електрозварювання ім. С. О. Патона з інноваційних рішень в галузі розробки технологій і обладнання контактної зварювання оплавлення залізничних рейок. Багато з них є піонерськими, що підтверджується рядом ліцензійних угод з провідними країнами світу. Сьогодні парк контактних машин і комплексів, що експлуатуються в світі, розроблених в ІЕЗ і виготовляємих Каховським заводом електрозварювального устаткування, обчислюється кількістю понад 2500, що становить близько 60 % світового парку машин. Бібліогр. 13, табл. 4, рис. 22.

*Ключові слова*: контактна стикова зварка, залізничні рейки, евтектоїдні і заевтектоїдні сталі, технології та обладнання, безперервне оплавлення, пульсуюче оплавлення, моделювання нагріву, довгомірні батоги, зварювання з натягом, моніторинг якості

## TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR FLASH-BUTT WELDING OF RAILS: 60 YEARS OF CONTINUOUS INNOVATIONS

**S.I. KUCHUK-YATSENKO**

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The article summarizes the 60-year experience of the E.O. Paton Electric Welding Institute in innovative solutions in the field of development of technologies and equipment for flash-butt welding of rails. Many of them are pioneering, which is confirmed by a number of licensing agreements with leading countries of the world. Today, the stock of flash-butt welding machines and complexes, operating throughout the world, designed at the PWI and manufactured by the Kakhovka Plant of Electric Welding Equipment, amounts to more than 2,500 units, which is about 60% of the global stock of machines. 13 Ref., 4 Tab., 22 Fig.

*Key words*: flash-butt welding, rails, eutectoid and hypereutectoid steels, technologies and equipment, continuous flashing, pulsating flashing, heating simulation, long-length rail strings, tension welding, quality monitoring

Поступила в редакцію 18.10.2018

### Новая книга

**Титан 2018. Производство и применение в Украине: Сб. докл. межд. конф. / Под ред. проф. С.В. Ахонина. — Киев: Международная Ассоциация «Сварка», 2018. — 168 с.**

В сборнике представлен 41 доклад международной конференции «Титан 2018. Производство и применение в Украине» (11–13 июня 2018 г., Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины), в которых отражены научные достижения и практические результаты в области производства, сварки, обработки и применения титана и его сплавов. Авторами докладов являются известные ученые и специалисты из Австралии, Польши и Украины. Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области индустрии титана и его сплавов.

Сборник можно заказать в редакции журнала «Автоматическая сварка».

