

## ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СКОЛЬЗЯЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОРПУСОВ БУКС КОЛЕСНЫХ ПАР ТЕЛЕЖЕК ГРУЗОВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ВАГОНОВ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

Пантелеенко Ф.И., Писарев В.А., Нестеров В.Г., Окунь Г.И., Папкович В.П.

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Целью настоящей работы является восстановление эксплуатационных свойств деталей грузовых железнодорожных вагонов

### 1. Исследования сварочных процессов при восстановлении скользящих поверхностей букс

Восстановление геометрических размеров букс проводится наплавкой электрической дуговой сваркой. Сварочная дуга является мощным концентрированным источником теплоты, т.к. электрическая энергия, потребляемая при сварке плавлением, в основном превращается в тепловую. Вследствие этого, соседние участки наплавленного и основного металла оказываются нагретыми до различных температур, а их охлаждение происходит с различной скоростью. Это приводит к затрудненному расширению нагреваемого металла и сокращению (усадке) его при охлаждении и в связи с этим возникновению соответствующих напряжений и деформаций.

Для металлов характерно термическое расширение, в общем случае [1] определяемое формулой:

$$\Delta l_0 = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где  $l_0$  – начальный линейный размер;

$\Delta T$  – разность между конечной и начальной температурами (К);

$\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения металла в рассматриваемом интервале температур 1/К.

Таким образом, теплота, вводимая при наплавке в конструкцию, определяет, вследствие линейных и объемных расширений и фазовых превращений, уровень внутренних напряжений и, соответственно, деформацию конструкции. Поэтому основным вопросом, требующим решения при наплавке изношенных поверхностей букс, является минимизация тепловложений.

Эффективная тепловая мощность процесса дуговой наплавки (сварки) определяется формулой:

$$Q_{\text{эф}} = k \cdot I_{\text{св}} \cdot U_{\text{св}} \cdot \eta, \quad (2)$$

где  $I_{\text{св}}$  – ток в сварочной цепи,

$U_{\text{св}}$  – напряжение в сварочной дуге,

$k$  – коэффициент, учитывающий влияние несинусоидальности кривых напряжения и тока на мощность дуги, который при сварке постоянным током принимается равным 1,

$\eta$  – коэффициент полезного действия нагрева изделия (отношение эффективной тепловой мощности дуги к полной тепловой мощности).

При рассмотрении процесса наплавки с точки зрения распространения теплоты можно рассчитать глубину проплавления основного металла, размеры сварочной ванны и зоны термического влияния, а также температуры в различных участках конструкции и законы их изменения, что позволит определить участки конструкции, где возникают наибольшие напряжения и недопустимые остаточные деформации.

Количество теплоты, введенное в наплавочный валик, характеризует погонная энергия наплавки, которая определяется отношением эффективной тепловой мощности дуги к скорости ее перемещения:

$$q_n = \frac{Q_{эф}}{V} = \frac{k \cdot I \cdot U \cdot \eta}{V}, \quad (3)$$

где  $V$  – скорость процесса наплавки.

При воздействии движущегося источника на поверхность полубесконечного тела температуру в любой точке можно определить по формуле:

$$T = \frac{Q_{эф}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot R} \cdot e^{-\frac{V}{2\alpha}(X+R)}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,

$R$  – расстояние точки от источника тепла,

$\alpha$  – коэффициент тепловложения,

$X$  – проекция точки по оси  $O - X$ .

Из этой формулы с учетом методики расчета температурных полей [3] с использованием так называемых безразмерных величин получаем уравнение

$$T = \frac{Q_{эф}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \alpha} \theta_3, \quad (5)$$

где  $\theta_3$  – зависимость между безразмерными величинами, определенная по номограмме. Таким образом можно определить температуру в любой точке конструкции и построить изотермы для различных видов и способов наплавки и определить степень влияния различных параметров наплавки на нагрев любых участков конструкции (в данном случае корпуса буксы). Отсюда следует, что температура точки в полубесконечном теле прямо пропорциональна эффективной мощности и обратно пропорциональна коэффициенту теплопроводности и расстоянию данной точки от источника тепла – сварочной ванны.

На распределение температуры в теле изделия большое влияние оказывает также скорость процесса – с увеличением скорости перемещения дуги области, нагреваемые выше определенной температуры, уменьшаются по площади и изотермы суживаются в направлении, перпендикулярном оси шва и сгущаются впереди дуги.

Для проведения вычислительных экспериментов по моделированию распределения температур определяются теплофизические свойства материала, изменение которых в зависимости от температуры представлено на рисунке 1.

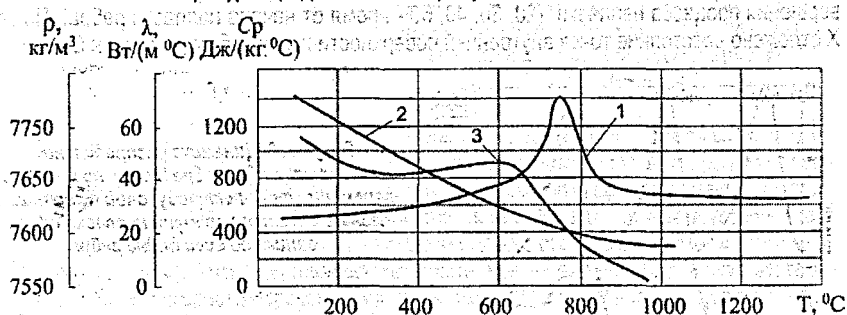
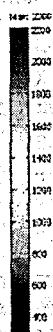
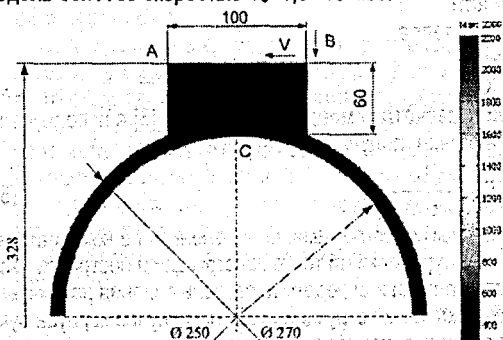


Рисунок 1. Изменение теплоемкости (1) теплопроводности (2) и плотности (2) материала буксы в зависимости от температуры

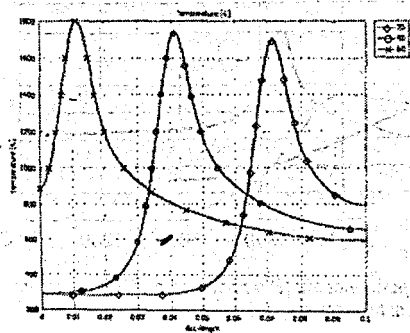
Для расчетов деформаций, возникающих при изменении температурных режимов при наплавке, представим конструкцию бусы в виде полуцилиндра с внутренним  $\varnothing 250$  мм, наружным –  $\varnothing 270$  мм с ребром – выступом АВ (рисунок 2). Процесс наплавки представляется в виде движущегося со скоростью  $V$  подвижного источника тепла от точки В к точке А с погонной энергией  $q_l$ . Термическое воздействие на конструкцию, напряжения и деформацию корпуса определяем по нагреву тела ребра бусы АВ и нагреву поверхности С (внутренний диаметр бусы под подшипники). При этом дуговой источник представим как тепловой поток мощностью  $q=5,3 \times 10^7$  Вт/м<sup>2</sup>, что соответствует тепловой мощности дуги при ручной дуговой сварке электродом  $\varnothing 3$  мм сварочным током 100А при напряжении на дуге 23-24В, проходящий через поперечное сечение ребра и движущийся вдоль оси Х со скоростью  $V_3=1,5 \times 10^{-3}$  м/с.



**Рисунок 2. Схематичное изображение конструкции бусы для определения деформаций, возникающих при изменении температурных режимов при наплавке**

Наглядное представление о динамике температур при наплавке изношенных поверхностей корпусов бус дает смоделированный процесс распределения температурного поля от движущегося источника нагрева при наплавке ребра бусы, полученное в реальном времени.

На графиках (рисунок 3) представлено распределение температур в ребре бусы при наплавке, когда по выступу ребра АВ перемещается электродуговой источник. Распределение температур определено в разные моменты времени наплавки ребра (рисунок 3), где показан характер распределения температур (К) в теле ребра на 20 секунде после начала наплавки, на 40с и на 60с. На рисунке 4 показано возрастание температур в разных точках на поверхности С внутренней стенки бусы в процессе наплавки и после завершения процесса наплавки. (20, 30, 40, 60 - время от начала наплавки ребра). По оси Х отложено расстояние точек внутренней поверхности корпуса бусы от точки С.



**Рисунок 3. Динамика распределения температур (К) в ребре бусы, по которой перемещается электродуговой источник, в разные моменты времени наплавки одного валика по всей длине ребра**

Распределение температур в ребре и на поверхности С буксы в разные моменты времени наплавки определялось из уравнения:

$$q(x) = \frac{A \cdot U \cdot I}{S} \exp(-k(x - V \cdot t)^2) \quad (6)$$

где  $A = 1$ ;  $U = 23$  В;  $I \approx 100$  А;  $k = 4 \cdot 10^4$  м<sup>-2</sup>;  $V_0 = 1,5 \times 10^{-3}$  м/с.

$$d = \frac{3,46}{\sqrt{k}} \text{ при } q = 0,05q_{\max}, S = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Как видно из приведенных графиков, даже использование электродов малого диаметра приводит к получению на поверхности внутренней стенки буксы температур более 200 °С, что в итоге даёт недопустимые деформации – изменение овальности и конусности посадочных поверхностей.

Приведенные результаты экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

1) при  $q_n = \text{const}$  с увеличением скорости наплавки области, нагретые выше определенных температур, уменьшаются главным образом по ширине. В направлении поперек шва изотермы сужаются, а впереди дуги — сгущаются;

2) при постоянной скорости сварки  $V = \text{const}$  с возрастанием мощности дуги области, нагретые выше определенных температур, увеличиваются, причем размеры их растут быстрее увеличения мощности;

3) при постоянной погонной энергии  $\frac{q_n}{V} = \text{const}$  увеличение мощности дуги ведет к расширению площадей, нагретых выше определенных температур, тогда как рост скорости наплавки уменьшает эти площади. При одновременном пропорциональном росте  $q_n$  и  $V$  мощность дуги  $q_n$  влияет сильнее, чем  $V$ , поэтому увеличение  $q_n$  и  $V$  при  $\frac{q_n}{V} = \text{const}$  расширяет площади соответствующих изотерм, причем размеры этих площадей примерно пропорциональны мощности.

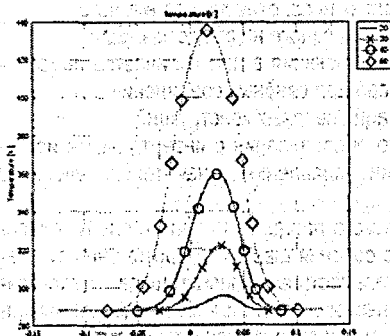


Рисунок 4. Возрастание температур (К) в разных точках на поверхности С внутренней стенки буксы в процессе наплавки и после завершения процесса наплавки. (20 с, 30 с, 40 с, 60 с - время от начала наплавки ребра)

Анализ результатов показывает, что уменьшить напряжения и деформации в корпусе буксы при восстановлении скользящих поверхностей электродуговой наплавкой можно следующими путями:

- 1) уменьшением эффективной тепловой мощности дуги – т.е. уменьшая сварочный ток;
- 2) увеличением скорости перемещения источника нагрева – сварочной дуги;
- 3) изменением коэффициента теплопроводности окружающей наплавляемое изделие среды – т.е. увеличивая теплоотвод от поверхности наплавляемых ребер, мы уменьшаем максимальную температуру в точке С – на цилиндрической поверхности корпуса буксы.

По результатам проведенных экспериментов с наплавкой ручной дуговой сваркой покрытыми электродами типа Э50А марок УОНИ 13/55 диаметром 4мм, 3мм и ЦУ-5 диаметром 2,5мм на режимах с минимальными значениями сварочного тока получение недопустимых деформаций внутренней цилиндрической поверхности корпуса буксы недостижимо, т.е. нагрев цилиндрической поверхности корпуса буксы в точке С превышает критический.

Поэтому проведены опытно-экспериментальные работы по наплавке с определенными ограничениями погонной энергии и поперечного сечения отдельных проходов. С этой целью в качестве сварочного процесса применяли механизированную сварку в среде защитных газов сварочной проволокой Св 08Г2С диаметром 0,8 мм и 1,0 мм. При этом для управления кристаллизацией металла шва и термомодеформационным циклом наплавку проводили с дискретным формированием швов, т.е. сварной шов формировали по длине и высоте из отдельных, взаимно перекрывающихся друг друга элементарных объемов металла. Очередной участок шва выполнялся после кристаллизации и охлаждения предыдущего. Дискретное формирование швов позволило, кроме уменьшения тепловложения, измельчать структуру шва и ЗТВ, изменить характер роста кристаллитов, повышать стойкость швов к образованию горячих трещин и улучшать механические свойства наплавленного металла.

Сварка пульсирующей дугой также применяется при ручной дуговой сварке покрытыми электродами и механизированной сварке в защитных газах для уменьшения тепловложения в свариваемый металл. Наибольшая частота пульсации мощности дуги, сравнимая с тепловой инерцией сварочной ванны, позволяет воздействовать на механизм кристаллизации металла шва, регулировать глубину провара и процесс формирования швов. Пульсацию электрических параметров дуги можно осуществлять путем включения в электрические цепи электронных или механических прерывателей. При механизированных способах дуговой сварки пульсацию дуги можно получить, регулируя скорость подачи электродной проволоки. Сварку пульсирующей дугой используют для решения различных технологических задач:

- повышения производительности сварки, в положениях, отличных от нижнего;
- облегчения выполнения корня шва, особенно при сварке на весу с зазором;
- измельчения первичного зерна металла шва, снижения в нем количества неметаллических включений и улучшения механических свойств сварных соединений;
- снижения остаточных напряжений и деформаций сварных конструкций.

Однако применение современного сварочного оборудования с инверторными источниками питания и синергетическими системами управления значительно увеличит стоимость процесса.

В общем случае при разработке технологического процесса наплавки следует стремиться к максимально возможному уменьшению сечения швов и их протяженности. Необходимо применять рациональную последовательность выполнения швов - механизированную сварку с целью уменьшения остаточных напряжений и деформаций выполнять от середины к краям, взброс и использовать обратно-ступенчатый метод.

Одним из эффективных и простых средств борьбы с остаточными деформациями и перемещениями элементов сварных конструкций является дополнительное охлаждение свариваемых и наплавленных изделий. Возможны способы уменьшения деформаций наплавленных или свариваемых изделий подачей охлаждающей жидкости, обдувом газовой смесью, использованием охлаждаемых подкладок и накладок в зажимных приспособлениях, теплоотводящих паст. Выбор того или иного способа охлаждения зависит от применяемого способа сварки, конструкции изделия, организации сварочных

работ и производственных возможностей предприятия. Для наплавки поверхностей букс принято решение процесс увеличения теплоотода проводить погружением корпуса буксы в охлаждающую жидкость – воду и погружать в воду корпус буксы после наплавки каждого короткого валика. Это возможно выполнить, так как корпус буксы изготовлены из материала (сталь 15Л, 20Л), в котором при охлаждении образуются мягкие закалочные структуры (малоуглеродистый мартенсит, имеющий низкую твердость).

Таким образом, уменьшение тепловложения достигается за счет оптимизации режима сварочного процесса, применения прерывистых швов, а также за счет дополнительного охлаждения наплавляемой поверхности. Однако для получения восстановленных наплавкой изделий с деформациями, находящимися в допуске, необходимо создание предварительного напряженно-деформированного состояния корпуса буксы. Нагружать корпус буксы необходимо винтовым домкратом усилием 10-15 тонн, так как нагружение гидравлическим домкратом создает плавающую – изменяющуюся с изменением размера посадочной поверхности буксы – нагрузку.

При создании распорного усилия по внутреннему диаметру 250 мм корпуса буксы момент на торце гайки или головки рассчитывается по формуле:

$$M_T = \int_0^{d_1} 2\pi \rho d \rho p f \rho = \frac{P_f}{3} \frac{D_1^3 - d_{oms}^3}{D_1^2 - d_{oms}^2} \quad (7)$$

Для технических расчетов вполне достаточную точность дает формула, основанная на допущении, что равнодействующая сила трения приложена на среднем радиусе опорной поверхности гайки или головки винта

$$M_T = P f \frac{D_{cp}}{2} \quad (8)$$

где

$$d_{cp} = \frac{D_1 + d_{oms}}{2} \quad (9)$$

Момент на торце гайки или винта составляет около 50% от всего момента затяжки. Подставляя полученные выражения для  $M_p$  и  $M_T$  в формулу момента завинчивания, получаем окончательно

$$M_{\text{зав}} = P \cdot \frac{d_2}{2} \left[ \operatorname{tg}(\beta + \varphi_1) + f \cdot \frac{d_{cp}}{d_2} \right] \quad (10)$$

где  $P$  - усилие, развиваемое винтом;

$d_2$  - средний диаметр резьбы;

$d_{cp}$  - средний диаметр опорной поверхности гайки (головки винта);

$\beta$  - угол подъема резьбы;

$\varphi$  - угол трения;

$f$  - коэффициент трения.

Приближенное геометрическое подобие резьб позволяет для ориентировочных расчетов пользоваться простейшими соотношениями, выведенными для средних параметров.

В качестве средних значений для нормальной метрической резьбы можно принять  $\beta = 2^\circ 30'$ ,  $d_2 = 0,9 d$ ,  $d_{cp} = 1,4 d$ .

Тогда при  $f = 0,15$ ,  $M \approx 0,2 P d$ .

Расчетная длина ручного гаечного ключа может быть принята в среднем  $14d$ .

Приравняв момент на ключе от силы руки  $Q$  моменту на винте, получаем соотношение между осевой силой на винте  $P$  и силой на ключе  $Q$ :  $P \approx 70 Q$ .

Используя винт с резьбой М30 и гайкой под размер зева ключа 46 мм, имеем длину ключа порядка 400 мм. Применяя для создания распорного усилия по диаметру 250 мм корпуса буксы рычага длиной порядка 2 м и прикладывая к рычагу силу в 30 кг, получаем распорное усилие равное 10500 кг.

Таким образом, предлагаемая винтовая система создания распорного усилия обеспечивает необходимую величину этого усилия.

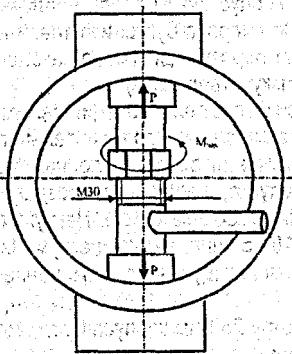


Рисунок 5. Схема создания предварительного напряженного состояния корпуса буксы винтовым домкратом при наплавке

## 2. Разработка технологии восстановления скользящих поверхностей корпусов букс

На основании результатов исследований разработана технологическая инструкция (ТИ) по восстановлению скользящих поверхностей корпусов букс грузовых вагонов методом наплавки в условиях производства Гомельского им. М.И. Каплинина вагоноремонтного завода. Она содержит требования, предъявляемые к сварочным материалам и оборудованию, персоналу, подготовке к наплавке и технологии выполнения наплавочных работ: способам и режимам сварки, порядку наложения сварных швов, рекомендации по организации сварочных работ, контролю качества наплавки и указания по технике безопасности при производстве сварочных работ.

В процессе наплавки должно быть обеспечено полное проплавление по кромкам наплавляемого валика и заделка кратера. Наплавку нужно выполнять возможно короткой дугой. Последующее зажигание дуги производится на металле шва на расстоянии 15-20 мм от окончания предыдущего валика. При выполнении наплавки для уменьшения сварочных напряжений и деформации конструкции необходимо соблюдать режим наплавки и выдерживать последовательность наложения швов.

Наплавку изношенных поверхностей корпусов букс грузовых вагонов выполняют механизированной сваркой в защитных газах постоянным током обратной полярности на режимах, приведенных в таблице 2.

Таблица 2. Режимы механизированной наплавки при восстановлении корпусов букс грузовых вагонов с применением механизированной сварки в защитных газах.

Диаметр сварочной проволоки	Параметры режима сварки		
	Сила тока, А	Напряжение, В	Расход защитного газа, л/мин
0,8 мм	50-70	18-20	6-9
1,0 мм	80-100	19-22	8-10

Для предварительного деформирования корпуса буксы – создания усилия раздачи посадочного отверстия корпуса буксы (нагрузки корпуса в направлении трущихся поверхностей) используется оснастка силовая, устанавливаемая в отверстие корпуса. Усилие нагрузки создается за счет завинчивания гайки при помощи ключа с рычагом.

Наплавку валиков на ребра скользящей поверхности необходимо выполнять от середины участка к краям, а порядок наложения валиков в соответствующей последовательности.

Наплавленные валики корпусов букс должны быть признаны негодными, если при контроле внешним осмотром и измерениями обнаружены следующие дефекты:

- трещины всех видов и направлений, расположенные в металле шва, по линии сплавления и в околошовной зоне на основном металле, в том числе микротрещины, выявляемые при металлографическом исследовании;

- несплавления по кромкам валиков наплавленного металла;

- подрезы основного металла и наплывы (натеки);

- свищи и поры;

- незаваренные кратеры.

При выявлении недопустимых дефектов производится ремонт с удалением дефектного участка, заваркой и последующим контролем отремонтированного участка.

Производится контроль геометрических размеров посадочного отверстия корпуса буксы с учетом остаточных деформаций от сварных соединений.

### 3. Заключение

По результатам выполненных работ проведена производственная аттестация технологии сварки в соответствии с требованиями СТБ ЕН 288-3, обучен и аттестован персонал, технология внедрена на Гомельском ВРЗ.

Экономический эффект от реализации технологии в условиях производства Гомельского ВРЗ в течение 5 месяцев составил 227 млн.рублей. При этом восстановлено 1245 корпусов букс.

### Литература

1. Петров Г.Л., А.С. Тумарев. Теория сварочных процессов. – Москва: Высшая школа, 1987.
2. Походня И.К. и др. Металлургия дуговой сварки. – Киев: Наукова думка, 2004.
3. Думов С.И. Технология сварки плавлением. – Ленинград: Машиностроение, 1987.
4. Молодых Н.В. и др. Восстановление деталей машин. Справочник. – Москва: Машиностроение, 1989.
5. Золотухин Н.М. Нагрев и охлаждение металла. – Москва: Машиностроение, 1973.
6. Ресурсосбережение и технологии в сварочном производстве. Справочное пособие под ред. С.К. Павлюка. – Минск: Высшая школа, 1989.
7. Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин ПТУ. – Новополоцк, 1997.
8. Регулирование тепловложений при дуговой сварке сталей. Г.И.Лащенко. «Сварщик в Белоруссии» № 3, 2006. – с. 19-21
9. Рыхалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. - Москва. 1951.
10. Сварка в машиностроении. – Москва: Машиностроение, 1978-1979, т. 1-4

УДК 669.245:539.216

## ОСАЖДЕНИЕ ПЛЁНОК TiNi ИОННО-ЛУЧЕВЫМ И ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДАМИ

*Рубаник В.В., Рубаник В.В. (мл.), Маркова Л.В., Андреев М.А.,  
Заболотина Ю.А., Милюкина С.Н.*

*Институт технической акустики НАН Беларуси, г. Витебск*

В последнее время в тонкопленочной технологии большое внимание уделяется разработке новых и усовершенствованию традиционных методов получения пленок различных соединений, в том числе и TiNi, что объясняется широким применением их в микроэлектронике, медицине и технике [1]. Целью настоящей работы является получение методами ионно-плазменного и ионно-лучевого осаждения тонких TiNi пленок.