

11. Кожина Т.Д., Курочкин А.В. Особенности проведения исследовательских испытаний по электрохимической обработке с осциллирующими электродами // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2015. – №1(32). – С. 89 – 93.
12. Кожина Т.Д., Курочкин А.В. Корригирование материалов для изготовления элементов базирования для операции ЭХО лопаток компрессора ГТД с целью поддержания их рохрематического цикла изготовления // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. – 2014. – №4(31). – С. 75 – 79.

### **ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СПОСОБА НАПЛАВКИ ТЕПЛОСТОЙКИМИ СТАЛЯМИ ВЫСОКОЙ ТВЕРДОСТИ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ**

*Н.Н. Малушин\*, Д.В. Валуев, А.П. Ковалев\*, Серикбол А. \**

*Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета  
652000, Кемеровская обл. г. Юрга, ул. Ленинградская, 26, тел. (38451)7-77-61.*

*E-mail: valuevden@rambler.ru*

*\*ОАО ЕвразСМК г. Новокузнецк*

*E-mail : nmalushin@mail.ru*

Для упрочнения деталей горно-металлургического оборудования широко применяются наплавочные материалы, разработанные на базе хромовольфрамовых теплостойких быстрорежущих сталей. Этими материалами наплавляют валки горячей прокатки, втулки и матрицы прессов, керны клещевых кранов, вырубные штампы, ножи ножниц, протяжки, развертки, резцы, ролики рольгангов, разнообразные валы и оси, моталки прокатных станов, детали молотковых дробилок и другие детали [1,2].

Основной трудностью, возникающей при наплавке хромовольфрамовыми сталями, является образование холодных (закалочных) трещин в процессе и после наплавки. Образование трещин затрудняется при повышении температуры мартенситного превращения и замедлении скорости охлаждения. Наиболее простой и эффективный способ борьбы с трещинами заключается в регулировании термического цикла путем выбора соответствующих методов и режимов наплавки, а также использования в необходимых случаях предварительного подогрева.

Температура подогрева деталей под наплавку зависит от многих факторов: состава основного и наплавляемого металла, формы детали, режима наплавки и требуемых свойств наплавленного металла. Чем больше склонность наплавленного металла к образованию трещин, тем выше должна быть температура предварительного подогрева, так как считается, что предупредить образование трещин другим путем невозможно. Для предупреждения трещин, снижения внутренних напряжений и получения достаточно пластичной структуры наплавленного металла применяют обязательный предварительный подогрев деталей до температуры 350–400 °С при наплавке высоколегированной электродной проволокой ПП–3Х2В8 или цельнотянутой ЭИ–701. Для устранения трещин при наплавке быстрорежущих сталей необходим предварительный и сопутствующий подогрев заготовок уже до температуры 500–700 °С [1,2].

Цель работы - обоснование выбора способа наплавки и оборудования для упрочнения деталей горно - металлургического оборудования теплостойкими сталями высокой твердости.

Традиционная технология изготовления биметаллических изделий (наплавка с подогревом – отжиг – закалка – отпуск) неоправданно продолжительна и трудоёмка. Существенным недостатком технологии является обязательное применение высокотемпературного подогрева ( $T_{\text{подогрева}}=350-700^{\circ}\text{C}$ ), замедленного охлаждения и, как следствие, последующей закалки наплавленной детали, при этом высокие эксплуатационные свойства закаливаемых сталей используются не полностью. Применение высокотемпературного подогрева при наплавке хромовольфрамовых сталей значительно усложняет технологический процесс получения биметаллического наплавленного изделия. Увеличиваются затраты на наплавку за счёт необходимости нагрева и поддержания высокой температуры. Процесс наплавки за счет применения высокотемпературного предварительного и сопутствующего подогрева и замедленного охлаждения значительно удлиняется. Рекомендованное для предотвращения холодных трещин замедленное охлаждение детали вызывает необходимость проведения последующей закалки биметаллического изделия, что само по себе, является сложной задачей из-за различных свойств наплавленного высоколегированного слоя и низколегированной сердцевины. Закалка некоторых крупногабаритных деталей практически не осуществима. Существующие техноло-

гические процессы наплавки инструментальных сталей не позволяют достаточно полно использовать свойства металла наплавленного слоя [1-3].

Поэтому актуальной является задача разработки и создания новых способов наплавки хромовольфрамовых сталей, позволяющих устранить отмеченные недостатки традиционной технологии и полностью использовать высокую твердость и износостойкость, заложенные металлургами и металловедцами при их создании. Целесообразно процессы наплавки и закалки совместить, что позволяет получать наплавленный слой в состоянии, близком к закаленному. Необходимо также исключить высокотемпературный подогрев или хотя бы снизить его температуру, применив новые способы борьбы с холодными трещинами.

Получить наплавленный металл, обладающий высокой стойкостью против образования холодных трещин и высокими механическими свойствами сразу же после окончания наплавки, можно путем регулирования термического цикла наплавки. Предлагаемый термический цикл для многослойной наплавки хромовольфрамовых закаливающих сталей показан на рисунке 1.

Особенность этого термического цикла заключается в трех стадиях термического нагрева. Первая обеспечивает ограниченное время нагрева и повышенную скорость охлаждения в области высоких температур, что предотвращает рост зерна и распад аустенита с образованием равновесных низкопрочных структур.

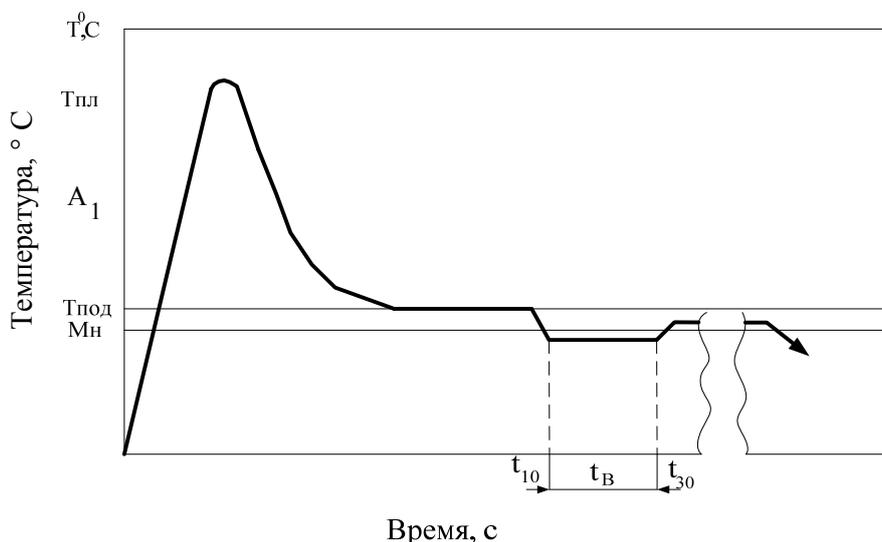


Рис. 1. Схема термического цикла при наплавке теплостойкими сталями

Первая стадия термического цикла обеспечивается применением высококонцентрированных источников нагрева (сжатой или плазменной дугой) и сопутствующего охлаждения наплавляемой детали. Вторая стадия термического цикла обеспечивает нахождение наплавленного металла в аустенитном состоянии при выполнении всех слоев в процессе наплавки. Это достигается путем применения предварительного подогрева на 50–100 °С выше температуры возникновения аномальной пластичности. Охлаждение наплавленной детали на третьей стадии термического цикла после окончания наплавки вызывает протекание фазовых превращений в хромовольфрамовом наплавленном металле, сопровождающихся возникновением аномальной пластичности (сверхпластичности). При этом внутренние временные напряжения в наплавленном изделии частично релаксируются, что позволяет получить наплавленный металл с низким уровнем остаточных напряжений, а, следовательно, с низкой склонностью к образованию холодных трещин [3-5].

Охлаждение наплавленного металла после завершения процесса приводит к образованию мартенсита. При этом отпадает необходимость проведения закалки наплавленной детали для увеличения прочности, твердости и износостойкости. Исключается необходимость проведения последующей сложной термической обработки наплавленной детали (отжиг – закалка – отпуск). В предлагаемом способе для увеличения твердости и износостойкости необходимо произвести только одну дополнительную операцию – высокотемпературный отпуск наплавленной детали.

Для получения наплавленного металла с низкой склонностью к образованию трещин нами предлагается регулировать уровень временных напряжений в процессе наплавки. Такое регулирование можно осуществить временным снижением температуры подогрева на 20–100 °С ниже температуры начала фазовых превращений. Это позволяет снизить уровень временных напряжений за счет их частичной релаксации при фазовых превращениях, сопровождающихся возникновением аномальной пластичности. Величина уменьшения температуры подогрева зависит от необходимого уровня снижения временных напряжений, получения структуры наплавленного металла с определенным количеством аустенита и мартенсита и интервала фазовых превращений. Желательно образование в структуре незначительного количества мартенсита. После частичной релаксации временных напряжений температуру подогрева необходимо повысить. После завершения процесса наплавки деталь необходимо охладить до температуры окончания фазовых превращений (по третьей стадии термического цикла).

Предложенный способ эффективен при наплавке быстрорежущих хромовольфрамовых сталей, обладающих низко расположенными температурами начала фазовых превращений ( $M_n=180^\circ - 380^\circ\text{C}$ ). Это позволяет значительно понизить температуру предварительного подогрева для стали Р18 с 500–600 °С до 230–280 °С и даже до 80–160 °С в предлагаемом способе, что уже само по себе упрощает технологию наплавки хромовольфрамовых сталей. Способ наплавки закаливаемых сталей обеспечивает высокую стойкость наплавленного металла против образования закалочных трещин и получение высокой твердости и износостойкости закаленного в процессе наплавки слоя. Типичная структура наплавленного металла после многослойной плазменной наплавки и высокотемпературного отпуска приведена на рисунке 2 (микроскоп - OLYPUSGX – 51, раствор для травления  $\text{HNO}_3$ , 3% спиртовой раствор)[3-5].

В работе исследовано влияние термической обработки на твердость и фазовый состав наплавленных быстрорежущих сталей типа Р18 и Р6М5. В качестве основного металла выбрана сталь 30ХГСА, обладающая высоким комплексом механических свойств.

Наплавка заготовки осуществлялась на установке для плазменной наплавки тел вращения. Валки наплавливали плазменной дугой с подачей в сварочную ванну нетоковедущей присадочной порошковой проволоки ПП-Р18Ю и ПП-Р6М5Ю. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон, защитного – азот. Плазменная наплавка осуществлялась по термическому циклу, представленному на рисунке 1.

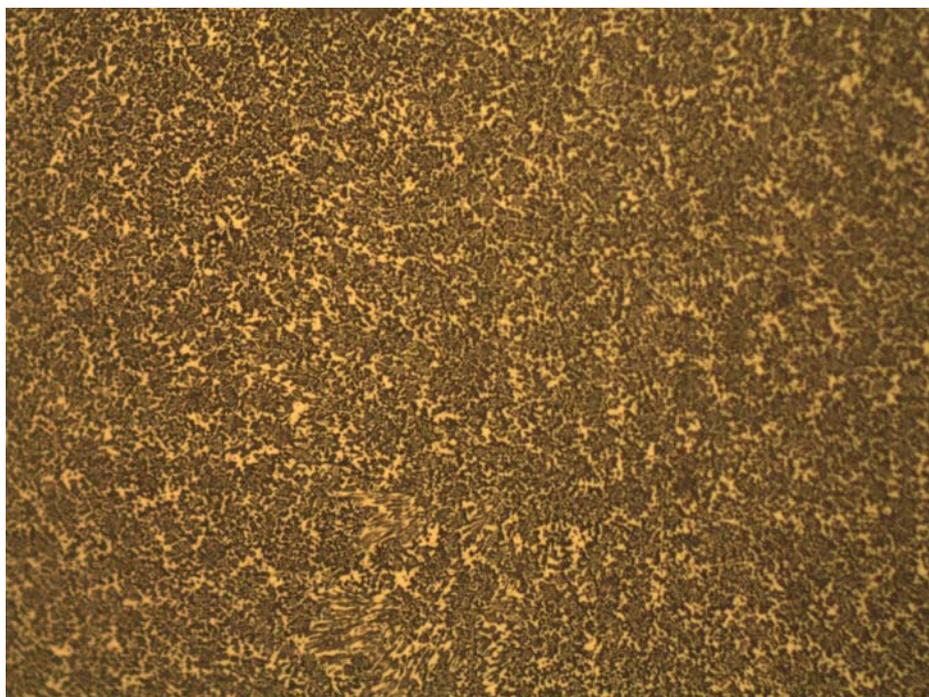


Рис. 2. Структура наплавленного металла после многослойной плазменной наплавки и высокотемпературного отпуска, x500

Заготовка с припусками под наплавку 10–12 мм на сторону устанавливалась в центрах наплавочной установки, производился предварительный подогрев до температуры 230 °С, включалось охлаждение шеек валка с расходом холодной воды до 2 л/мин. После завершения подготовительных операций производилась 5–6-ти слойная наплавка. Режим наплавки рабочих валков диаметром 100 мм и длиной бочки 315 мм: сварочный ток  $I_{св}=150\dots160$  А, напряжение дуги  $U_{д}=50\dots55$  В, скорость наплавки  $v_{н}=18$  м/ч, скорость подачи порошковой проволоки  $v_{п.пр.}=60$  м/ч, смещение с зенита 10...12 мм, длина дуги  $l_{д}=20$  мм, расход защитного газа азота  $Q_{заш. N}=20\dots22$  л/мин, расход плазмообразующего газа аргона  $Q_{плазм. Ar}=6\dots8$  л/мин., диаметр проволоки 3, 7 мм. Продолжительность наплавки 3 часа, после окончания наплавки валок охлаждался на воздухе.

Дефекты наплавки при визуальном осмотре и ультразвуковом контроле валков не обнаружены. Качество наплавленной поверхности удовлетворительное. Твердость наплавленного металла после наплавки составляет HRC 54–58. Для увеличения твердости и износостойкости проводился 4–х кратный часовой отпуск при 580 °С. Твердость наплавленных валков после высокотемпературного отпуска соответствует требованиям, предъявляемым к поверхностному слою рабочих валков холодной прокатки. После отпуска проводилась окончательная механическая обработка.

Из верхних слоев наплавленного металла вырезались образцы размером 70x10x5 мм на станке электроискровой резки для каждой марки стали. Половина образцов от партии подвергались термической обработке, режимы которой в случае наплавленных образцов выбирались из рекомендаций для близких по составу кованных сталей P18 и P6M5.

Состояние металла после наплавки, а также после наплавки и термической обработки оценивали по результатам рентгеноструктурного и физико-химического фазового анализов. Физико-химический анализ проводится для изучения распределения и карбидообразующих элементов между твердым раствором и карбонитридной фазой. Образцы подвергались предварительно анодному растворению с поверхности для устранения измененного слоя после электроискровой резки и шлифования. Физико-химическое изолирование карбонитридной фазы проводилось в 15 %-ном водном растворе поваренной соли и 2,5 % винной кислоты. Плотность тока составляла 0,03–0,06 А/см<sup>2</sup>, время электролиза 30–40 мин. Содержание карбидообразующих элементов в карбонитридной фазе определялось по отношению к навеске растворенного металла. Фазовый состав наплавленных быстрорежущих сталей типа P18 (а, б) и P6M5 (в, г) показан на рисунке 3[3,6].

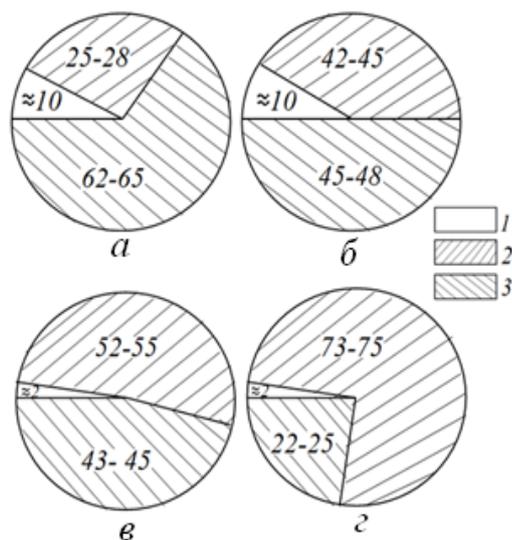


Рис. 3. Фазовый состав наплавленных быстрорежущих сталей типа P18 (а, б) и P6M5 (в, г):  
а, в – термически необработанные; б, г – после отжига и закалки;  
1 – карбонитрид  $M_6(CN)$ ; 2 – мартенсит; 3 – остаточный аустенит

В быстрорежущих сталях возможно образование карбидов типа  $M_6C$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_2C$ ,  $MC$ , а в сталях с азотом также нитридов и карбонитридов. Рентгеноструктурный анализ показал, что основной составляющей анодного осадка является фаза, изоморфная карбиду  $M_6C$ . В анодном осадке присут-

ствуют также в малом количестве  $M_{23}C_6$  и следы  $M_2C$ . Содержание  $M_{23}C_6$  в наплавленных термически необработанных сталях несколько больше, чем в закаленных.

Твёрдость металла после наплавки по данному способу приближается к твёрдости закаленных сталей (HRC 52–58). За счёт высокого температурного отпуска твёрдость можно повысить до HRC 62–66. Наплавка по предложенному способу позволяет полностью использовать свойства наплавленного металла.

Основой выбора в качестве способа упрочнения плазменной наплавки является возможность реализации предложенной схемы термического цикла.

Плазменная наплавка в последние годы вызывает повышенный интерес среди способов упрочнения и активно внедряется в различные отрасли промышленности и в настоящее время выходит на одно из ведущих мест. Резкое расширение объема и областей применения плазменной наплавки за последние годы обусловлено повышением качества упрочненных деталей и их высокой эксплуатационной стойкостью. Повышение интереса в нашей стране и зарубежом к плазменной наплавке как способу нанесения износостойких покрытий с целью упрочнения новых и восстановления изношенных деталей объясняется рядом преимуществ перед другими способами наплавки: такими как высокая производительность, широкая возможность легирования наплавленного металла, возможность применения различных наплавочных металлов, большой диапазон регулирования ввода теплоты в основной и наплавляемый металлы, пригодность плазменной наплавки к автоматизации с применением электронной системы регулирования плазменного процесса. Перечисленные положительные стороны способов плазменной наплавки не только существенно расширяют технологические возможности их применения, но и позволяют получать значительный экономический эффект за счет наплавки слоев с минимальной глубиной проплавления и сохранения первоначальных физико-механических свойств при меньшем количестве наплавленного металла [3].

Распределение теплового потока в пятне нагрева сжатой (плазменной) дуги во многом определяет ее технологические особенности и область применения. Если вдали от источника тепла температурное поле в изделии не зависит от характера распределения теплового потока, то на расстояниях, соизмеримых с размерами пятна нагрева, распределение теплового потока существенно влияет на температурное поле, определяя геометрию наплавляемого валика, глубину проплавления основного металла, величину зоны структурных превращений. При наплавке в этой области развиваются процессы, изменяющие свойства основного и направленного металла у зоны оплавления и в значительной степени влияющие на кристаллизацию наплавленного металла, диффузионные процессы, образование прослоек, рост зерна аустенита.

Большое влияние на технологические возможности процесса наплавки оказывает полярность сжатой дуги. Прямая полярность обуславливает низкую тепловую нагрузку на электрод плазматрона, высокую пространственную устойчивость столба дуги, но при этом для получения хорошего смачивания поверхности изделия наплавляемым металлом и отсутствия в нем дефектов необходима тщательная подготовка поверхности изделия под наплавку. Использование сжатой дуги обратной полярности позволяет устранить трудоемкие, усложняющие технологический процесс наплавки операции по предварительной очистке поверхности изделия. Очистка наплавляемой поверхности от загрязнений происходит в этом случае непосредственно в процессе наплавки за счет эффекта катодного распыления, и тем самым обеспечиваются необходимые условия смачиваемости поверхности изделия наплавляемым металлом и бездефектное формирование наплавленного слоя. При наплавке на обратной полярности достигается и меньшее разбавление наплавляемого металла основным. Особенностью сжатой дуги, как источника тепла, является то, что ее тепловые и газодинамические характеристики могут легко регулироваться в широких пределах. Это обеспечивает решение многих технологических задач по восстановлению и упрочнению деталей машин и инструмента, приданию им особых эксплуатационных свойств [2,3].

В разработанных в Сибирском государственном индустриальном университете (СибГИУ) технологических процессах изготовления деталей горно-металлургического оборудования в качестве способа нанесения активного рабочего слоя предлагается использовать плазменную наплавку, кото-

рая позволяет реализовать на практике первую стадию термического цикла, положенного в основу разработанного способа наплавки.

Объемы применения плазменной наплавки для восстановления и упрочнения быстроизнашивающихся деталей машин и инструмента сегодня во многом определяются наличием соответствующего оборудования. В стране серийно выпускается несколько типов установок для плазменной наплавки, с использованием которых можно выполнить наплавку по различным схемам, но при этом большую долю составляют установки для плазменно-порошковой наплавки. Для плазменной наплавки, с использованием проволок выпускаются установки УД-417 и УПН-302. В общем случае, для реализации принятого процесса плазменной наплавки комплект оборудования, входящего в наплавочную установку, должен обеспечивать выполнение следующих основных операций: возбуждение и длительное стабильное функционирование сжатой дуги на заданных режимах; перемещение сжатой дуги относительно наплавляемой поверхности по требуемой траектории; строго дозированная подача наплавочного материала.

В СибГИУ разработана и успешно применяется установка для плазменной наплавки деталей горно - металлургического оборудования, скомпонованная из серийно выпускаемого оборудования. Для плазменной наплавки нетоковедущей порошковой проволокой была использована установка, состоящая из манипулятора, задней бабки, модернизированного аппарата А-384 и пульта управления. Источником питания служит выпрямитель аппарата АПР-401У4. В качестве плазмотрона использован плазмотрон, разработанный сотрудниками университета и успешно зарекомендовавший себя в эксплуатации [3]. Из серийно выпускаемого оборудования достаточно легко модернизируется для плазменной наплавки нетоковедущими порошковыми проволоками установка УД-417.

#### **Выводы**

1. Традиционная технология наплавки хромовольфрамистых сталей с высокотемпературным подогревом и замедленным охлаждением трудоемка и недостаточно эффективна и не позволяет полностью использовать высокие эксплуатационные свойства наплавленного металла.

2. Разработан способ многослойной наплавки, основой которого является соблюдение определенного термического цикла. Особенностью предложенного способа наплавки является применение низкотемпературного предварительного и сопутствующего подогрева ( $T_{под} = 230 - 280 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Для получения наплавленного металла с низкой склонностью к образованию трещин регулируется уровень временных напряжений в процессе наплавки путем их частичной релаксации за счет проявления эффекта кинетической пластичности в момент протекания мартенситного или бейнитного превращений.

3. В качестве технологического способа, реализующего предложенную схему наплавки, выбрана плазменная наплавка нетоковедущей порошковой проволокой на обратной полярности в среде азота и разработано специальное оборудование (установка и плазмотрон).

#### **Литература.**

1. Малушин Н. Н. , Валуев Д. В. Испытание деталей металлургического оборудования на износостойкость и контактную прочность предназначенного для производства деталей горно-шахтного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2012 - №. 12 - С. 90-95
2. Малушин Н. Н. , Валуев Д. В. Устройства и термический цикл при плазменной наплавке деталей металлургического оборудования быстрорежущими теплостойкими сталями // Russian journal of Earth Sciences. - 2013 - №. 4. - С. 4-13
3. Малушин Н.Н. Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями / Н.Н. Малушин, Д.В. Валуев - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 358 с.
4. Малушин Н.Н., Вострецова Т.Г. Регулируемый термический цикл для плазменной наплавки прокатных валков теплостойкими сталями // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. №3. С.14 – 16.
5. Малушин Н.Н. Наплавка с низкотемпературным подогревом теплостойкими сталями деталей металлургического оборудования/Н.Н. Малушин, В.Л. Осетковский, И.В. Осетковский//Заготовительные производства в машиностроении, 2014, №10, С.6–10.
6. Малушин Н. Н. , Валуев Д. В. Азотирование наплавленных деталей металлургического оборудования // Технология металлов. - 2013 - №. 7. - С. 26-28