ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Издается с января 2003 г.

Том 21 № 7 июль 2023

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
СЕРИКОВА Е.А.
ОРЛОВА А.В.

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63952 от 09.12.2015

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" **39205**) или непосредственно в издательстве.

Тел.: (499) 268-47-19, 269-54-96
Http: //www.mashin.ru
E-mail: zpm@mashin.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 2.5.7 — Технологии и машины обработки давлением; 2.5.8 — Сварка, родственные процессы и технологии; 2.6.1 — Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 2.6.3 — Литейное производство; 2.6.4 — Обработка металлов давлением; 2.5.5 — Порошковая металлургия и композиционные материалы; 2.6.6 — Нанотехнологии и наноматериалы; и в базу данных Chemical Abstracts

Научная статья
УДК 621.791.92
DOI: 10.36652/1684-1107-2023-21-7-296-302

Разработка комплексной технологии упрочнения валков холодной прокатки плазменной наплавкой

Николай Николаевич Малушин[1], *д-р техн. наук*, **Виктор Евгеньевич Громов**[2]✉, *д-р физ.-мат. наук*, **Денис Анатольевич Романов**[3], *д-р техн. наук*, **Людмила Петровна Бащенко**[4], *канд. техн. наук*, **Андрей Петрович Ковалев**[5]
[1, 2, 3, 4, 5] *Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, gromov@physics.sibsiu.ru*✉

Аннотация. Предложена комплексная технология упрочнения наплавленных быстрорежущими сплавами деталей горно-металлургического оборудования, состоящая из плазменной наплавки, термической обработки, процессов азотирования и ультразвуковой обработки. Основой технологии является технологический процесс плазменной наплавки в защитно-легирующей среде азота порошковой проволокой, позволяющий получать наплавленный слой без трещин, пор и дефектов макро- и микроструктур с твердостью поверхности в среднем 56 HRC. Основной вклад в упрочнение наплавленного теплостойкого металла вносит четырехкратный отпуск при температуре 560...580 °С. После наплавки и отпуска твердость металла увеличивается до 62...64 HRC вследствие превращения остаточного аустенита в мартенсит, выделения карбидов и карбонитридов. Вклад процессов азотирования и ультразвуковой обработки в упрочнение наплавленного металла после отпуска составляет 1...2 HRC.

Ключевые слова: плазменная наплавка в среде азота, регулируемый термический цикл, порошковая проволока, азот, твердость, теплостойкие сплавы

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, https://rscf.ru/project/23-19-00186/. Исследования проведены с использованием оборудования ЦКП "Структура, механические и физические свойства материалов" ФГБОУ ВО "Новосибирский государственный технический университет".

Для цитирования: Разработка комплексной технологии упрочнения валков холодной прокатки плазменной наплавкой / Н.Н. Малушин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Бащенко, А.П. Ковалев // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21, № 7. С. 296—302. DOI: 10.36652/1684-1107-2023-21-7-296-302.

Original article

Development of complex hardening technology of cold rolling rolls by plasma surfacing

Nikolay N. Malushin[1], **Viktor E. Gromov**[2]✉, **Denis A. Romanov**[3], **Lyudmila P. Bashchenko**[4], **Andrey P. Kovalev**[5]
[1, 2, 3, 4, 5] *Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, gromov@physics.sibsiu.ru*✉

Abstract. A comprehensive technology for hardening of mining and metallurgical equipment parts deposited by high-speed alloys is proposed, consisting of plasma surfacing, heat treatment, nitriding processes and ultrasonic treatment. The basis of the technology is the technological process of plasma surfacing in a protective-alloying environment of nitrogen with flux-cored wire, which makes it possible to obtain a deposited layer without cracks, pores and defects in macro- and microstructures with a average surface hardness of 56 HRC. The main contribution to the hardening of the deposited heat-resistant alloy is made by a fourfold tempering at a temperature of 560...580 °C. After surfacing and tempering, the hardness of the alloy increases to 62...64 HRC. The increase in hardness occurs due to the conversion of residual austenite into martensite, the release of carbides and carbonitrides. The contribution of nitriding and ultrasonic treatment processes to the hardening of the deposited alloy after tempering is 1...2 HRC.

Keywords: plasma surfacing in nitrogen, adjustable thermal cycle, powder wire, nitrogen, hardness, heat-resistant alloys

Введение. Быстрорежущие теплостойкие сплавы обладают высокой твердостью и износостойкостью, именно поэтому их применяют в качестве наплавочных материалов для упрочнения поверхностного слоя деталей машин и оборудования горно-металлургического

комплекса, работающих в условиях абразивного изнашивания и высоких температур. В процессе наплавки и охлаждения в наплавленном слое образуются холодные трещины, для борьбы с которыми применяют предварительный и сопутствующий подогрев до температуры 400...700 °С и замедленное охлаждение наплавленного изделия. При этом происходит образование пластичных продуктов распада аустенита, обладающих низкой твердостью и износостойкостью, что вызывает необходимость проведения после наплавки сложной термической обработки [1, 2].

В СибГИУ разработаны способы наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости, претерпевающими фазовые превращения. Предложено использовать эффект повышенной пластичности и регулируемый низкотемпературный подогрев [2—4]. В результате применения этих способов наплавки можно избежать образования трещин и снизить энергетические затраты. Изготовление плазменной наплавкой теплостойкими сплавами в азотсодержащей среде деталей позволило получить наплавленный слой в закаленном состоянии без трещин и дефектов макро- и микроструктуры, с низким уровнем остаточных напряжений. Наплавленная поверхность имеет высокую и достаточно равномерную твердость 62...64 HRC после трех-четырехкратного высокотемпературного отпуска при 560...580 °С [2, 5—7]. Для дополнительного повышения твердости (выше 64 HRC) и износостойкости наплавленных деталей после термической обработки предложено применять азотирование и ультразвуковую поверхностную упрочняющую обработку. Технологическая схема плазменной наплавки с применением дополнительных упрочняющих технологий приведена на рис. 1.

Применяя рекристаллизационный отжиг в процессе эксплуатации (после отработки определенного времени) наплавленных рабочих валков холодной прокатки, можно дополнительно повысить их стойкость. На заключительном этапе при выходе валка из строя вследствие естественного износа возможно его восстановление наплавкой.

Цель работы — оценка эффективности и возможности применения комплексных технологий, основой которых является плазменная наплавка, для упрочнения деталей горнометаллургического оборудования, работающих в условиях абразивного износа и высоких температур.

Методика проведения исследований. Для изготовления наплавленных деталей предложено использовать плазменную наплавку на обратной полярности нетоковедущей порошковой проволокой как способ нанесения износостойких покрытий. Плазменная наплавка является высококонцентрированным источником нагрева и позволяет реализовать на практике первую стадию регулируемого термического цикла, положенного в основу разработанных способов наплавки [2, 5—9].

Плазменная наплавка обладает рядом преимуществ перед другими способами наплавки: высокая производительность, широкая возможность легирования состава наплавленного металла, возможность применения различных наплавочных металлов, широкий диапазон регулирования ввода теплоты в изделие.

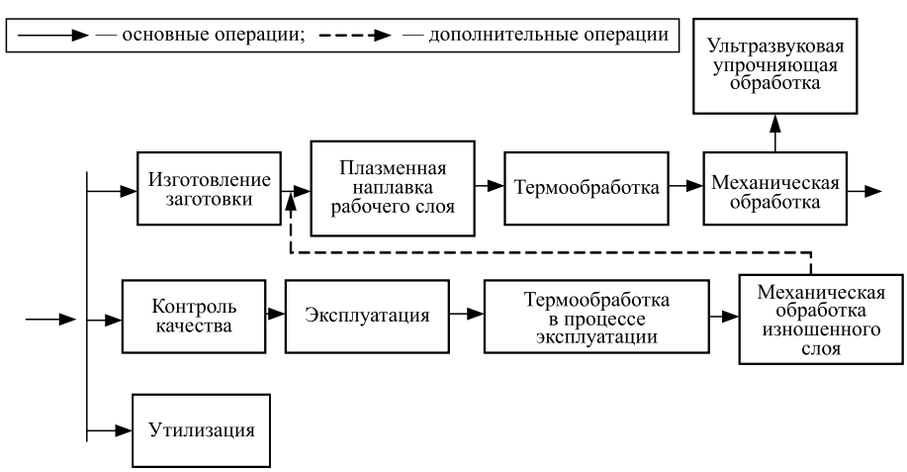


Рис. 1. Технологическая схема применения комплексных технологий упрочнения

Распределение теплового потока в пятне нагрева сжатой дуги во многом определяет технологические особенности и область применения, влияет на геометрию и размеры температурного поля и наплавляемого валика, глубину проплавления основного металла, величину зоны структурно-фазовых превращений. Сжатая (плазменная) дуга обратной полярности позволяет в результате эффекта катодного распыления проводить очистку наплавляемой поверхности в процессе наплавки, что обеспечивает необходимые условия для смачиваемости поверхности изделия наплавляемым металлом и бездефектное формирование наплавленного слоя. Наплавка на обратной полярности обеспечивает меньшее разбавление наплавляемого металла основным металлом заготовки, что позволяет уменьшить количество наплавляемого металла вследствие уменьшения числа наплавляемых слоев [2, 5—9].

Для плазменной наплавки на обратной полярности порошковой проволокой разработаны технологический процесс и оборудование для его реализации. Установка для плазменной наплавки порошковыми проволоками может быть скомпонована из серийно выпускаемого сварочного оборудования или применена модернизированная установка УД-417 [2, 5—9].

Для плазменной наплавки в среде азота разработаны составы порошковых проволок ПП-Р18Ю, ПП-Р6М5Ю, ПП-Р2М9Ю и др., которые обеспечивают получение наплавленного металла типа теплостойких сплавов высокой твердости. Порошковые проволоки и технология их нанесения обеспечивают высокие значения твердости (62...64 HRC) и износостойкости рабочих поверхностей. Использование в качестве защитного газа азота взамен аргона позволяет дополнительно упрочнить наплавленный металл за счет легирования его азотом из газовой фазы непосредственно в процессе наплавки (до 0,06...0,08 % N) [2, 5—9].

Для устранения пористости, вызванной азотным кипением, в состав шихты порошковой проволоки вводили алюминий, который связывает избыточный азот в нерастворимые в жидком металле соединения. Для уменьшения склонности к порообразованию, вызванному водородом, в состав шихты дополнительно вводили кремнефтористый или алюмофтористый натрий, а также пыль фильтров алюминиевого производства, связывающие водород в соединение [HF] [2, 5—9].

Технологический процесс изготовления наплавленных деталей состоит из следующих основных этапов: механическая обработка заготовки под наплавку, плазменная наплавка, отпуск наплавленной детали, окончательная механическая обработка, контроль качества активного слоя.

Для деталей небольших диаметров заготовки для наплавки изготовляли из проката стали 30ХГСА, обладающей комплексом высоких механических свойств и хорошей свариваемостью. Наплавку заготовки осуществляли на установке для плазменной наплавки тел вращения по термическому циклу с применением низкотемпературного предварительного и сопутствующего подогрева, временного снижения температуры подогрева в интервале протекания мартенситного превращения и выдержки при этой температуре [10]. Детали наплавляли плазменной дугой с подачей в хвостовую часть сварочной ванны нетоковедущей присадочной порошковой проволоки ПП-Р2М9Ю. Для увеличения твердости и износостойкости в состав порошковой проволоки вводили азотированный феррохром и титан [11, 12]. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон, в качестве защитного газа — азот.

Режим плазменной наплавки заготовок диаметром 100 мм [2, 5—10]: сварочный ток 150...160 А; напряжение дуги 50...55 В; скорость наплавки 18 м/ч; скорость подачи проволоки 60 м/ч; смещение с зенита 10...12 мм; длина дуги 20 мм; расход азота 20...22 л/мин; расход аргона 6...8 л/мин; диаметр проволоки 3,7 мм.

Заготовку устанавливали в центрах наплавочной установки, предварительно подогревали до 230 °С и проводили наплавку первого слоя. Таким же образом осуществляли многослойную наплавку. После окончания наплавки заготовку охлаждали на воздухе. Наружные и внутренние дефекты наплавки (поры, трещины и шлаковые включения) при визуальном осмотре валков и их ультразвуковой и магнитной дефектоскопии не обнаружены.

Твердость и структуру наплавленных теплостойких сплавов высокой твердости исследовали на образцах следующего химического состава, % мас.: 0,86 C; 4,84 Cr; 2,30 W; 8,40 Mo; 0,50 V; 0,65 Al; 0,06 N; остальное — Fe. Основной металл: прокат из низколегированной стали 30ХГСА, содержащей, % мас.: 0,3 C; 0,9...1,1 Cr; 0,8...1,1 Mn; 0,9...1,2 Si [5—7, 13, 14]. Наплавлен-

ные детали подвергали высокотемпературному отпуску при температуре 560...580 °С, 1 ч. Число отпусков — 5.

Диски из наплавленных деталей вырезали анодно-механической резкой, а образцы из дисков — электроискровой резкой. Образцы разрезали на параллельные пластинки толщиной 0,25...0,30 мм. Образцы подвергали азотированию и ультразвуковой поверхностной упрочняющей обработке. Газовое азотирование проводили в атмосфере газообразного аммиака (температура нагрева 560 °С, время выдержки 20...30 ч, степень диссоциации 35...45 %).

Проводили ультразвуковую обработку дисков, вырезанных из наплавленных прокатных валков диаметром 100 мм. Использовали ультразвуковой станок модели 4Д772Э, который обеспечивал рабочую частоту задающего генератора 20,5...27 кГц. В качестве инструмента применяли составной концентратор с экспоненциальным переходным участком и коэффициентом усиления 10. Составной концентратор изготовляли из стали 35 с наконечником из стали ШХ15 диаметром 8 мм [2, 5—7].

Подготовку поверхности образцов для металлографических исследований проводили в несколько этапов: сначала образцы выравнивали на мелкой наждачной бумаге и алмазной пасте, после этого электролитическим способом стравливали деформированный слой и выравнивали поверхность. Состав электролита: 80 мл H_3PO_4 + 6 г Cr_2O_3 + 14 мл H_2O. Плотность тока 0,4...0,8 А/см^2, напряжение на электродах 40...60 В. Раствор для травления поверхности образцов: 2%-ный раствор азотной кислоты [6—8, 12, 13].

Структурно-фазовое состояние наплавленного теплостойкого сплава высокой твердости исследовали методами растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа на приборе Leo EVO 50XVP (Carl Zeiss, Германия). Твердость измеряли по методу Роквелла согласно ГОСТ 9013—59.

Результаты исследований и их обсуждение. Улучшить свойства наплавленного высоколегированного сплава, а также обеспечить благоприятное напряженное состояние позволяет применение дополнительно после наплавки высокотемпературного отпуска. На рис. 2 приведены значения твердости наплавленного сплава в состоянии после наплавки и высокотемпературного отпуска при 560...580 °С (число отпусков — 5). Твердость сплава после наплавки составляет в среднем 56 HRC, а после отпуска на вторичную твердость достигает 62...64 HRC. Для увеличения твердости и износостойкости целесообразно проведение четырехкратного отпуска в течение 1 ч. Изучение влияния числа отпусков на твердость теплостойкого сплава показало, что проведение пятого отпуска нецелесообразно, так как не приводит к повышению твердости. Твердость увеличивается вследствие превращения остаточного аустенита в мартенсит, выделения карбидов и карбонитридов [5—7, 13, 14].

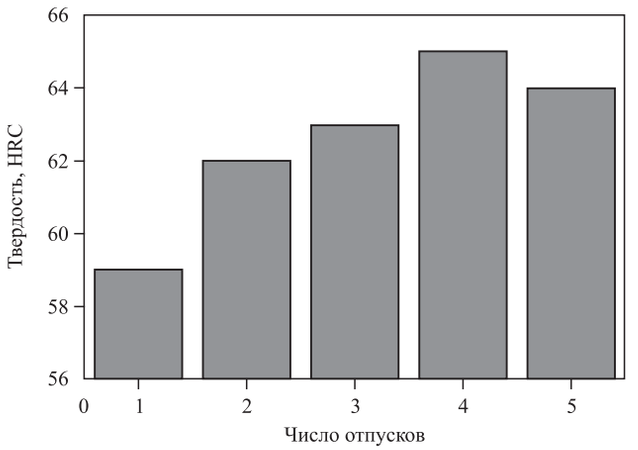
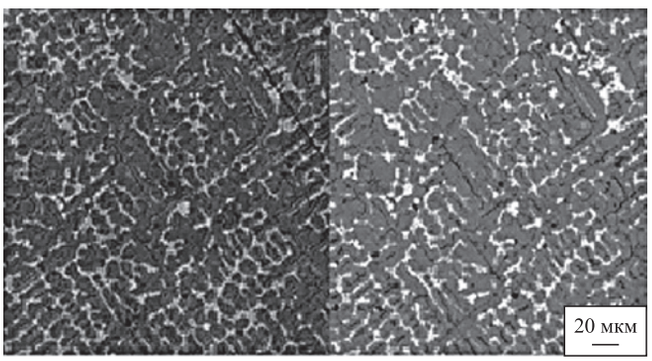


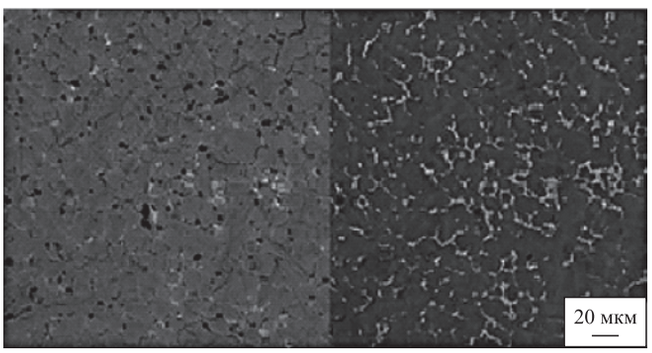
Рис. 2. Влияние числа высокотемпературных отпусков на твердость наплавленного теплостойкого металла

В работах [5—7, 13, 14] приведены результаты исследования структурно-фазового состояния теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного многослойной плазменной наплавкой в среде азота. Установлено, что в состав всех наплавленных сплавов в исходном состоянии входят твердый раствор α-железа и соединения на основе железа, вольфрама и молибдена переменного состава Fe_4W_2N, $FeWN_2$, Fe_4Mo_2N, Fe_4W_2C, а также твердые растворы на основе алюминия и фаза AlN. В случае последующего после наплавки высокотемпературного отпуска основными фазами структуры наплавленных сплавов являются твердый раствор α-железа и сложный карбид, в состав которого входят хром, алюминий, вольфрам, молибден — $(Fe, Cr, Al, W, Mo)_6C$, присутствует карбонитрид Fe_6W_6NC [5—7, 13, 14].

Четырехкратный высокотемпературный отпуск наплавленного сплава при температурах 560...580 °С вызывает изменение фазового состава, параметра кристаллической решетки, размеров блоков когерентного рассеяния и уменьшает внутренние упругие напряжения [5—7].



а)



б)

Рис. 3. Структуры наплавленного сплава Р2М9Ю после наплавки (*а*) и после наплавки и высокотемпературного отпуска (*б*):

слева и справа — структуры во вторичных и в отраженных электронах

На рис. 3, *а* (поверхность) показана явно выраженная ориентированная дендритная структура наплавленного сплава Р2М9Ю. Основная часть поверхности — перлитные зерна. В стыках и по границам зерен располагается цементит. Наплавленный теплостойкий сплав содержит большое количество легирующих элементов, поэтому цементит имеет сложный состав типа $(Fe, Cr, Al, W, Mo)_3C$, присутствуют также твердые растворы на основе алюминия и фаза AlN [5—7].

После плазменной наплавки и высокотемпературного отпуска (рис. 3, *б*) ориентированная дендритная структура практически не просматривается. Видны более четкие границы перлитных зерен. Количество зерен сложного цементита в стыках зерен и по их границам существенно меньше. Видны следы выпадения цементита (черные образования по границам перлитных зерен) [7, 13, 14].

Как видно из рис. 3, многослойная плазменная наплавка порошковыми проволоками обеспечивает получение наплавленного металла без трещин, пор и дефектов макро- и микроструктуры.

Исследования наплавленного металла после высокотемпературного отпуска и азотирования показали, что на высоколегированных быстрорежущих сплавах не удается получить глубину слоя более 0,20...0,25 мм с твердостью после азотирования 1100...1240 HV. Дополнительную упрочняющую обработку в виде азотирования для наплавленных быстрорежущих сплавов рекомендуется применять только в том случае, когда требуются повышенная коррозионная стойкость и высокая твердость поверхностного слоя изделия [2, 5—7].

Изучено влияние технологических факторов ультразвуковой поверхностной упрочняющей обработки на твердость образцов. Результаты не позволяют сделать однозначного вывода о ее влиянии на упрочнение наплавленного металла. Из зависимости твердости HRC образцов от амплитуды ультразвуковых колебаний A следует, что наибольший интерес представляет область амплитуд A = 20 мкм, так как в этой области упрочнение и разупрочнение максимальны. При скорости обработки v = 20 м/мин и амплитуде A = 20 мкм (рис. 4) максимальное упрочнение получено при нагрузке $P_н$ = = 10 Н [2, 5—7].

Исследования показали, что при определенных значениях интенсивности ультразвуковой обработки возможно снижение различных показателей упрочненного слоя. Однако существует область оптимальных значений техно-

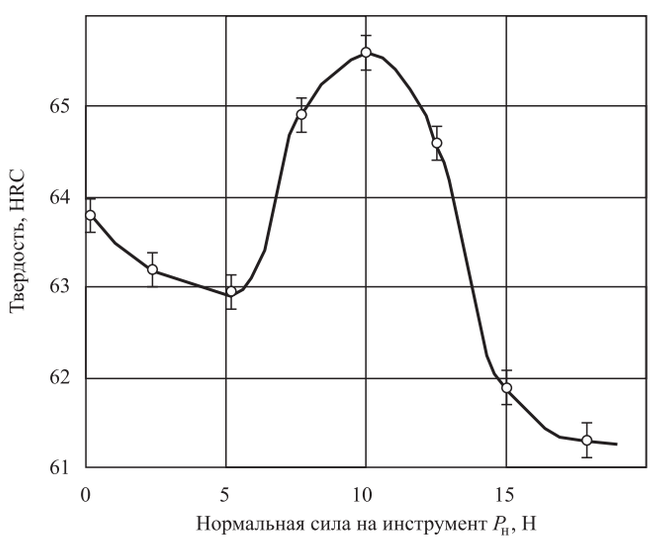


Рис. 4. Изменение твердости наплавленного металла в зависимости от параметров ультразвуковой поверхностной упрочняющей обработки (v = 20 м/мин; A = 20 мкм)

логических факторов ультразвуковой поверхностной обработки ($P_н$ = 10 Н; A = 20 мкм, v = 20 м/мин), в пределах которой наблюдается резкое увеличение всех характеристик упрочненного слоя наплавленного металла. Механизм ультразвукового поверхностного упрочнения аналогичен действию наклепа. При пластической деформации происходит измельчение зерна и дробление крупных дендритов. Дополнительное упрочнение наплавленного металла обусловлено ростом микроискажений кристаллической решетки. Эффективность применения ультразвука объясняется снижением сопротивления поверхностных слоев металла поверхностному деформированию. Это вызвано изменением кинематики деформирования поверхностных слоев, а также возникновением в обрабатываемой детали упругих ультразвуковых колебаний [2, 5—9].

Результаты исследования ультразвуковой поверхностной упрочняющей обработки наплавленного сплава показали возможность получения благоприятной эпюры остаточных напряжений, увеличения твердости поверхности обработанных ультразвуком образцов, получения оптимальной микроструктуры поверхностного слоя. На оптимальных параметрах процесса при базовой твердости наплавленного сплава 64 HRC возможно ее увеличение на 1...2 HRC, что позволяет повысить эксплуатационные характеристики наплавленных валков [2, 5—9].

Проведение отжига в процессе эксплуатации наплавленных валков холодной прокатки приводит пластически деформированный металл в более устойчивое структурное состояние. При этом за счет явления рекристаллизации снимается наклеп зоны сплавления основного металла с наплавленным металлом, структура металла и его свойства становятся аналогичными свойствам валка, который не был в эксплуатации. Устранение зоны наклепа предотвращает зарождение очагов усталостного разрушения и существенно снижает вероятность образования отслоений, т.е. устраняется основная причина выхода валков из строя, в результате их стойкость возрастает.

Нижняя граница предлагаемого температурного интервала ограничена температурой начала рекристаллизации основного металла (450 °С). Процессы рекристаллизации непосредственно связаны с температурой нагрева (протекают тем быстрее, чем выше температура нагрева). Поэтому температуру нагрева (температуру отжига) для снятия наклепа зоны сплавления целесообразнее выбирать как можно выше, но не ниже, чем температура рекристаллизации. При более низкой температуре отжига (меньшей, чем температура рекристаллизации) исходные свойства зоны сплавления не восстанавливаются, так как низкая температура нагрева и происходящий при этом возврат незначительно повышают пластичность, но только рекристаллизация полностью восстанавливает пластичность металла [2, 7].

Проведение отжига рабочего слоя, наплавленного теплостойкими сталями высокой твердости, в температурном интервале: температура рекристаллизации основного металла — температура отпуска наплавленного металла (450...580 °С) приводит к повышению сопротивления усталости основного металла при сохранении высокой твердости наплавленного слоя. С увеличением температуры отжига выше температуры отпуска наплавленного металла (560...580 °С) твердость наплавленного теплостойкими сталями поверхностного слоя уменьшается вследствие распада мартенсита, коагуляции карбидов, что приводит к снижению износостойкости прокатных валков. В случае выхода из строя наплавленных деталей из-за естественного износа возможна их повторная наплавка [2, 5—7].

Промышленные испытания показали, что стойкость наплавленных валков, изготовленных с применением комплексных технологий упрочнения, в 1,5—2,0 раза выше стойкости рабочих валков холодной прокатки, изготовленных с применением традиционной технологии.

Выводы

1. Разработана комплексная технология упрочнения наплавленных быстрорежущими сплавами валков холодной прокатки, состоящая из плазменной наплавки заготовки, высокотемпературного отпуска наплавленной заготовки, азотирования и ультразвуковой обработки после отпуска. Для наплавленных валков холодной прокатки предложено применять рекристаллизационный отжиг в процессе эксплуатации.

2. Технологический процесс плазменной наплавки (на обратной полярности) порошковой

проволокой в среде азота обеспечивает получение наплавленного металла типа теплостойких быстрорежущих сплавов и позволяет получать наплавленный слой без трещин, пор и дефектов макро- и микроструктур с твердостью поверхности в среднем 56 HRC.

3. Основной вклад в упрочнение наплавленного теплостойкого сплава вносит четырехкратный отпуск при температуре 560...580 °С. Твердость сплава после наплавки и отпуска повышается до 62...64 HRC вследствие превращения остаточного аустенита в мартенсит, выделения карбидов и карбонитридов.

4. Азотирование и ультразвуковая обработка увеличивают твердость наплавленного металла после высокотемпературного отпуска на 1...2 HRC. Азотирование и ультразвуковую обработку следует применять только в тех случаях, когда другие возможности повышения твердости наплавленного слоя исчерпаны.

5. Рекристаллизационный отжиг рекомендуется применять для восстановления свойств зоны сплавления основного металла с наплавленным металлом и для увеличения износостойкости наплавленных валков холодной прокатки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Технология** электрической сварки металлов и сплавов плавлением / под редакцией академика Б.Е. Патона. Москва: Металлургия, 1974. 768 с.

2. **Малушин Н.Н., Валуев Д.В.** Обеспечение качества деталей металлургического оборудования на всех этапах их жизненного цикла путем применения плазменной наплавки теплостойкими сталями. Томск: НТЛ, 2013. 358 с.

3. **Гнюсов С.Ф.** Применение эффекта сверхпластичности сталей в инструментальном производстве. Томск: Томский политехнический университет, 2008. 237 с.

4. **Эффект** кинетической пластичности и его применение при плазменной наплавке теплостойких сплавов с низкотемпературным подогревом / Н.Н. Малушин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Бащенко, А.П. Ковалев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18, № 2. С. 180—187.

5. **Упрочнение** деталей металлургического оборудования плазменной наплавкой в среде азота / Н.Н. Малушин, Н.В. Мартюшев, Д.В. Валуев, А.И. Карлина, А.П. Ковалев, Р.А. Гизатулин // Металлург. 2021. № 12. С. 93—99.

6. **Упрочнение** поверхностного слоя валков холодной прокатки многослойной плазменной наплавкой в среде азота / Н.Н. Малушин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Бащенко, А.П. Ковалев, Ю.А. Шлярова // Заготовительные производства в машиностроении. 2022. Т. 20, № 1. С. 42—48. DOI: 10.36652/1684-1107-2022-20-1-42-48.

7. **Малушин Н.Н.** Физические основы комплексной технологии упрочнения теплостойких сплавов высокой твердости, сформированных плазмой в среде азота: специальность 01.04.07: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Малушин Николай Николаевич. Новокузнецк, 2022. 36 с.

8. **Физические** основы комплексных технологий упрочнения деталей на базе плазменной наплавки в среде азота / Н.Н. Малушин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Бащенко, А.П. Ковалев // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18, № 4. С. 399—407.

9. **Малушин Н.Н., Романов Д.А.** Физическая природа упрочнения теплостойкого металла высокой твердости, сформированного высокотемпературной плазмой в среде азота // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64, № 12. С. 877—885.

10. **Патент № 2699488 РФ.** Способ многослойной наплавки теплостойкими сталями высокой твердости в азотсодержащей среде: заявл. 20.02.2019: опубл. 05.09.2019 / Малушин Н.Н., Романов Д.А., Осетковский В.Л., Ковалев А.П., Будовских Е.А., Валуев Д.В.

11. **Патент № 26344526 РФ.** Шихта порошковой проволоки: заявл. 07.12.2016: опубл. 31.10.2017 / Малушин Н.Н., Будовских Е.А., Сапожков С.Б., Валуев Д.В., Осетковский В.Л., Ковалев А.П., Осетковский И.В.

12. **Патент № 2681049 РФ.** Шихта порошковой проволоки для наплавки в азотсодержащей среде: заявл. 21.11.2017: опубл. 01.03.2019 / Малушин Н.Н., Будовских Е.А., Осетковский В.Л., Ковалев А.П., Осетковский И.В., Гизатулин Р.А.

13. **Структурно-фазовое** состояние теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного плазменной наплавкой в среде азота и высокотемпературным отпуском / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов, А.П. Ковалев, В.Л. Осетковский, Л.П. Бащенко // Известия вузов. Физика. 2019. Т. 62, № 10 (742). С. 106—111.

15. **Распределение** микротвердости и структуры по слою теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного многослойной плазменной наплавкой в среде азота / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов, А.П. Ковалев, Л.П. Бащенко, А.П. Семин, В.Е. Громов // Известия вузов. Физика. 2021. Т. 64, № 7. С. 75—80.

Статья поступила в редакцию 17.05.2023; одобрена после рецензирования 19.05.2023; принята к публикации 19.05.2023.