

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

**Администрация Правительства Кузбасса**

**Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»**

**Сибирский государственный индустриальный университет**

*Посвящается 100-летию  
со дня рождения ректора СМИ,  
доктора технических наук,  
профессора Н.В.Толстогузова*

**МЕТАЛЛУРГИЯ:  
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО  
«Металлургия – 2021»**

*Труды*

*XXII Международной научно-практической конференции*

*10 – 11 ноября 2021 г.*

*Часть 2*

**Новокузнецк  
2021**

## Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,  
д.т.н., профессор Н.А. Козырев, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,  
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, к.т.н. Е.Н. Темлянцева,  
д.т.н., доцент В.В. Зимин, д.т.н., профессор А.Г. Никитин,  
к.э.н., доцент Ю.С. Климашина

М 540      **Металлургия : технологии, инновации, качество : труды XXII Международной научно-практической конференции. В 2 частях. Часть 2 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр. ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2021. – 347 с. : ил.**

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и технологии процессов сварки, порошковой металлургии, получения композиционных материалов и покрытий, тепло- и массопереноса в металлургических процессах и агрегатах, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов, охраны труда, автоматизации и моделирования металлургических процессов, инновационных металлургических технологий в машиностроении, экономико-управленческих проблем металлургических регионов.

**ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ**

Администрация Правительства Кузбасса  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»  
АО «ЕВРАЗ ЗСМК»  
АО «Русал-Новокузнецк»  
АО «Кузнецкие ферросплавы»  
АО «НЗРМК им. Н.Е. Крюкова»  
Ляонинский университет науки и технологии, г. Аньшань, КНР  
ОАО «Черметинформация»  
Издательство Сибирского отделения РАН  
Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»  
Журнал «Вестник СибГИУ»  
Журнал «МАТЕС Web of Conferences »  
Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»  
АО «Кузбасский технопарк»  
Западно – Сибирское отделение Российской Академии естественных наук  
Совет молодых ученых Кузбасса

### *Заключение.*

В рамках представленной работы была разработана и опробована технологическая схема переработки цементата производства золота, содержащего благородные металлы.

Данная схема позволяет селективно получить несколько продуктов:

- осадок золота, содержание Au > 98 %;
- осадок серебра, содержание Ag > 98 %;
- концентрат МПГ, содержание Pt > 45 % и Pd > 15 %;
- концентрат родия, содержание Rh > 10 %.

В качестве дальнейшего направления развития темы предполагается проведение исследований состава получаемого концентрата родия и его аффинажа.

### Библиографический список

1. Лебедь А.Б. Аффинаж золотосеребряных сплавов на ОАО Уралэлектромедь: учебное пособие / А.Б. Лебедь, Г.И. Мальцев, С.В. Мамяченков. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 160 с.
2. Гинзбург С.И. Аналитическая химия платиновых металлов / С.И. Гинзбург [и др.]. М.: Наука, 1972. 616 с.
3. Основы металлургии. Т.5 / Под ред. Н.С. Грейвера [и др.]. М.: Металлургия, 1968. 624 с.
4. Пат. 2398898 РФ. Способ селективного извлечения палладия, платины и родия из концентратов / В.А. Шипачев; опубл. 10.09.2010.
5. Гинзбург С.И. Руководство по химическому анализу платиновых металлов и золота. М.: Наука, 1965 г. 314 с.
6. Федоров И.А. Родий. М.: Наука, 1966 г. 276 с.
7. Г.Г. Минеев, А.Ф. Панченко. Растворители золота и серебра в гидрометаллургии. – М.: Металлургия, 1994. – 241 с.

УДК 621.791.92

## **КОМПЛЕКСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГОРНО – МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПЛАЗМЕННОЙ НАПЛАВКИ В СРЕДЕ АЗОТА**

**Малушин Н.Н., Громов В.Е., Романов Д.А., Башенко Л.П., Ковалев А.П.**

*Сибирский государственный индустриальный университет,  
г. Новокузнецк, Россия, nmalushin@mail.ru*

*Аннотация.* Для повышения твердости деталей горно – металлургического оборудования применены комплексные технологии упрочнения: плазменная наплавка в защитнолегирующей среде азота, высокотемпературный отпуск, азотирование и ультразвуковая упрочняющая обработка, дополнительный высокотемпературный отпуск в процессе эксплуатации и повторная наплавка изношенного слоя. Основой упрочнения является плазменная наплавка, обеспечивающая твердость поверхности 55 – 57 HRC. Основной вклад в упрочнение наплавленного сплава вносит высокотемпературный отпуск (8 - 10 HRC) и ультразвуковая обработка, что увеличивает твердость до 65 – 66 HRC.

*Ключевые слова:* комплексные технологии упрочнения, плазменная наплавка, азотирование, ультразвуковая обработка, высокая твердость.

## **COMPLEX TECHNOLOGIES OF HARDENING OF MINING AND METALLURGICAL EQUIPMENT PARTS BASED ON PLASMA SURFACING IN NITROGEN MEDIUM**

**Malushin N.N. Gromov V.E., Romanov D.A. Baschenko L.P., Kovalev A.P.**

**Annotation.** *To increase the hardness of mining and metallurgical equipment parts, complex hardening technologies were applied: plasma surfacing in a protective nitrogen environment, high-temperature tempering, nitriding and ultrasonic hardening treatment, additional high-temperature tempering during operation and re-surfacing of the worn layer. The basis of hardening is plasma surfacing, which provides a surface hardness of 55-57 HRC. The main contribution to the hardening of the deposited alloy is made by high-temperature tempering (8-10 HRC) and ultrasonic treatment, which increases the hardness to 65-66 HRC.*

**Keywords:** *complex hardening technologies, plasma surfacing, nitriding, ultrasonic treatment, high hardness.*

К поверхностному слою деталей машин горно – металлургического оборудования, работающих в условиях абразивного изнашивания, высоких температур и переменном тепловом режиме (рабочие и опорные валки прокатных станов, валы и ролики дробилок аглофабрик и др.) предъявляются повышенные требования по твердости и износостойкости [1-3]. Для упрочнения широко применяются различные способы наплавки теплостойкими сталями типа P18, P6M5, P2M9, 3X2B8. Теплостойкие стали приобретают свои высокие служебные характеристики (твердость 62 – 64HRC, теплостойкость до 620<sup>0</sup> С) в результате термической обработки (заковки и высокотемпературного отпуска). При наплавке теплостойких сталей образуются холодные трещины, для предотвращения которых традиционная технология наплавки использует замедленное охлаждение деталей. В результате наплавленный слой имеет низкую твердость и износостойкость, так как проведение полной термической обработки биметалла трудноосуществимо, а для многих деталей невозможно. В итоге свойства высоколегированного теплостойкого металла используются неполностью [4, 5].

В Сибирском государственном индустриальном университете (СибГИУ) разработаны способы наплавки, основанные на применении эффекта кинетической пластичности и использовании низкотемпературного подогрева [5-7]. Эти способы позволяют получать наплавленный металл в состоянии близком к закаленному состоянию и без образования трещин. Для повышения твердости применены комплексные технологии упрочнения деталей горно – металлургического оборудования, основой которой является применение плазменной наплавки в защитнолегирующей среде азота. В качестве дополнительных упрочняющих технологий используются термическая обработка наплавленного металла, химико – термическая обработка (азотирование) и ультразвуковая упрочняющая обработка (УЗУПО), дополнительный высокотемпературный отпуск в процессе эксплуатации и повторная наплавка изношенного слоя (рисунок 1).

Целью настоящей работы является оценка вклада плазменной наплавки, термообработки, азотирования и ультразвуковой упрочняющей обработки в повышение твердости и износостойкости наплавленных деталей.

В разработанных в СибГИУ технологических процессах изготовления деталей горно – металлургического оборудования в качестве способа нанесения активного рабочего слоя предлагается использовать плазменную наплавку. 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 превращения. Использование сжатой дуги обратной полярности позволяет производить очистку наплавливаемой поверхности от загрязнений непосредственно в процессе наплавки за счет эффекта катодного распыления, что обеспечивают необходимые условия смачиваемости поверхности изделия наплавливаемым металлом и бездефектное формирование наплавленного слоя. При наплавке на обратной полярности достигается меньшее разбавление наплавливаемого металла основным. Использование азота в качестве защитного газа позволяет снизить затраты на наплавку, но и эффективно легировать наплавленный металл азотом непосредственно из газовой фазы.

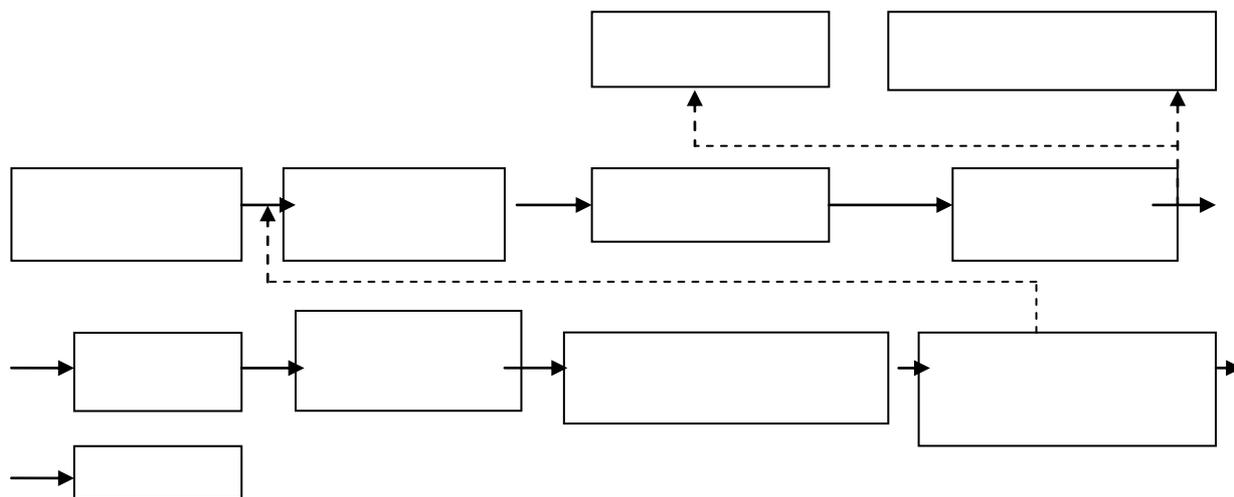


Рисунок 1 - Комплексные технологии упрочнения деталей горно – металлургического оборудования

Для реализации способа многослойной плазменной наплавки разработаны порошковые проволоки, шихта которой содержит углерод, хром, молибден, вольфрам, ванадий, алюминий, железо, никель, пыль электрофильтров алюминиевого производства, В состав шихты дополнительно введены азотированный феррохром и титан. Порошковые проволоки обеспечивает получение наплавленного металла типа стали P2M9Ю и P18Ю[5]. Порошковые проволоки предназначены упрочнения деталей машин, работающих в условиях абразивного износа. Диаметр порошковой проволоки 2,7 + 3,7 мм; коэффициент наплавки – 18–20 Г/А·ч; коэффициент разбрызгивания не более 3,5 %. Твердость наплавленного металла HRC 59 – 60, после высокотемпературного отпуска – HRC 62 – 66.

Для плазменной наплавки использовали установку УД-417. Наплавку вели по винтовой линии порошковой проволокой диаметром 3,7 мм на заготовки из стали 30ХГСА. с шагом 10...12 мм на режиме: сварочный ток  $I_{св} = 240-260\text{А}$ , напряжение на дуге  $U_d = 50-55\text{В}$ ,  $V_n = 18\text{ м/ч}$ , скорость подачи порошковой проволоки  $V_{п.п.} = 60\text{ м/ч}$ , смещение с зенита 10...12 мм, длина дуги  $l_d = 20\text{ мм}$ . Многослойная плазменная наплавка производилась с температурой предварительного и сопутствующего подогрева 250 – 300 °С. Температура снижения температуры для релаксации напряжений в процессе мартенситного превращения составляла 150 – 200 °С. Наружные и внутренние дефекты наплавки при визуальном осмотре валков, ультразвуковой и магнитной дефектоскопии не обнаружены. Качество наплавленной поверхности удовлетворительное [5,8,9].

В работе исследовалось влияние термической обработки на твердость и фазовый состав наплавленных теплостойких сплавов типа P18, следующего химического состава: 0,86 %С; 4,84 %Cr; 17,0 %W; 5,40 %Mo; 0,50 %V; 0,65% Al; ,0,06 % N .В качестве основного металла выбрана сталь 30ХГСА, обладающая высоким комплексом механических свойств (состав 0,3 % С, 9–1,1 % Cr , 0,8–1,1 % Mn и 0,9–1,2 % Si).

Из верхних слоев наплавленного металла вырезались образцы на станке электроискровой резки. Половина образцов от партии подвергались термической обработке, режимы которой в случае наплавленных образцов выбирались из рекомендаций для близких по составу кованых сталей P18 (температура нагрева 580 С, время выдержки 1 час, число отпусков 4). Влияние высокотемпературного отпуска на твердость поверхности оценивали по методу Роквелла. Исследования микротвердости проводились методом Викерса, который позволяет получить обоснованные представления о свойствах материалов в локальных микрообъемах образцов. Основной прибор для испытаний материалов на микротвердость - прибор ПМТ-3. Исследование структурно-фазового состояния наплавленного металла проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на приборе Leo EVO 50XVP (Карл Цейс, Германия) [5,10].

Исследования показали, что твердость поверхности наплавленного в среде азота ме-

талла составляет 54–58 HRC. Для увеличения твердости и износостойкости проводился 4–х кратный часовой высокотемпературный отпуск при 580 С. Влияние числа отпусков на твердость теплостойкого показано на рисунке 2. Как видно из данных рисунка 2, после 3 - 4 х, кратного отпуска твердость возрастает до 62 – 64 HRC и проводить более четырех отпусков нецелесообразно. Увеличение твердости за счет проведения высокотемпературного отпуска объясняется превращением остаточного аустенита в мартенсит, эффектом дисперсионного твердения и образованием кардонитридов.

Применение дополнительно после наплавки высокотемпературного отпуска, позволяет улучшить свойства наплавленного высоколегированного металла, а также обеспечить благоприятное напряженное состояние. Положительно на увеличении твердости наплавленного металла сказывается применение в качестве защитно-легирующей среды в процессе плазменной наплавки азота и введение в шихту порошковой проволоки алюминия в определенных пределах. В процессе наплавки происходит легирование наплавленного металла азотом непосредственно из газовой фазы, что позволяет дополнительно повысить твердость рабочего слоя изделия. Алюминий вводили в состав шихты порошковой проволоки для устранения пористости за счет связывания избыточного азота в нерастворимые в жидком металле соединения, способные дополнительно упрочнять металл за счет образования мелкодисперсных частиц нитридов [1].

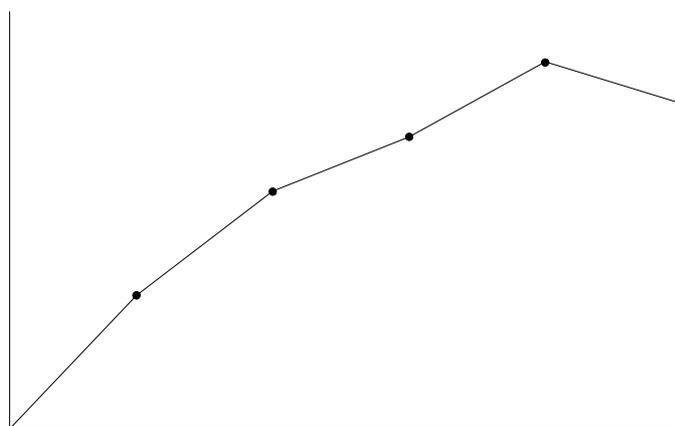


Рисунок 2 – Влияние высокотемпературного отпуска на твердость наплавленного металла

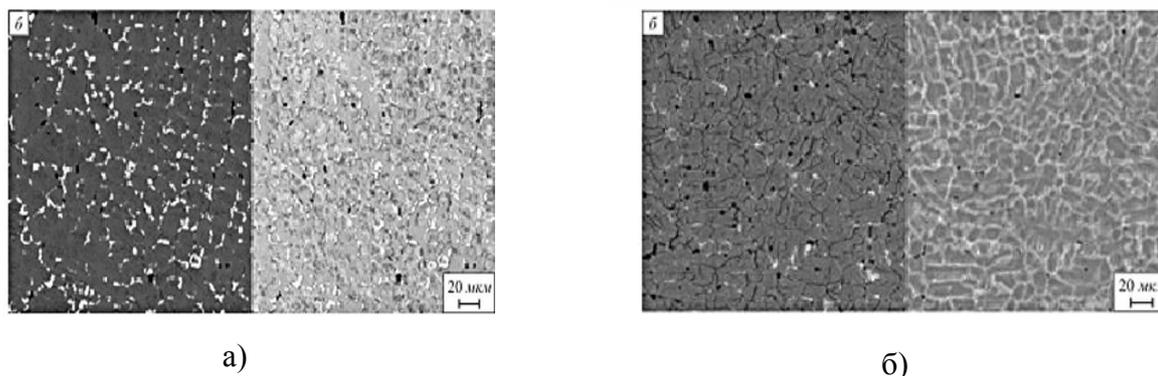


Рисунок 3 – Структура наплавленного теплостойкого сплава после наплавки (а) и после наплавки и высокотемпературного отпуска (б)

Структура наплавленного металла (рисунок 3) при этом близка по своему составу к структуре теплостойкой стали типа P18 в закаленном состоянии и состоит из мартенсита (25- 30 %), карбонитридов (до 10 %) и остаточного аустенита (60 – 65 %). Получение такой структуры наплавленного металла обеспечивается плазменной наплавкой с

низкотемпературным подогревом. Сохранению в наплавленном металле большого количества остаточного аустенита способствует кратковременная выдержка в процессе наплавки при температуре вблизи температуры начала мартенситного превращения  $M_n$ , что связано с эффектом стабилизации переохлажденного аустенита.

Исследования микротвердости наплавленного металла показали, что наплавленный металл в состоянии после наплавки находится в состоянии близком к закаленному с высокой твердостью. Многослойная плазменная наплавка велась по винтовой линии с перекрытием валиков, поэтому металл подвергался сложному термическому воздействию. Такой способ наплавки приводит к значительной неравномерности твердости и микротвердости. Для повышения износостойкости неравномерность твердости и микротвердости необходимо устранить, для чего предлагается применить высокотемпературный отпуск. Высокотемпературный отпуск приводит к повышению микротвердости, выравниванию значения микротвердости и, кроме того разброс значений микротвердости уменьшился. Проведенные исследования отдельных зон наплавленного металла подтверждают это заключение.

Наплавленный в среде азота металл подвергался газовому азотированию в атмосфере газообразного аммиака (температура нагрева 560 °С, время выдержки 20 – 30 часов, степень диссоциации 35 – 45 %.).

В работе проводилась ультразвуковая обработка дисков, вырезанных из наплавленных прокатных валков диаметром 100 мм, рабочий слой которых соответствовал сплаву P18Ю. Использовался ультразвуковой станок модели 4Д772Э, обеспечивающий рабочую частоту задающего генератора в пределах от 20,5 до 27 кГц. В качестве инструмента применялся составной концентратор с экспоненциальным переходным участком (коэффициент усиления 10) из стали 35 с наконечником из стали ШХ15 диаметром 8 мм.

Использования наплавленного металла для последующего газового азотирования в атмосфере газообразного показали, что на наплавленных высоколегированных сплавах типа сплава P18 не удастся получить глубину слоя более 0,20–0,25 мм с твердостью после азотирования порядка 1100–1240 НВ. Введение дополнительной упрочняющей технологии в виде азотирования для наплавленного теплостойкого металла целесообразно в тех случаях, когда требуется повышенные твердость и особенно, коррозионная стойкость.

Одним из возможных способов увеличения твердости наплавленного теплостойкого сплава является упрочняющая ультразвуковая обработка. Проведенные исследования показали, что влияние ультразвуковой обработки на упрочнение наплавленного металла нельзя оценивать однозначно. При определенных значениях интенсивности ультразвуковой обработки возможно снижение тех или иных показателей упрочненного слоя. Однако существует область оптимальных значений ( нормальное усилие на инструмент  $P_n = 10$  Н, амплитуда колебаний  $A = 20$  мкм, скорость обработки  $V = 20$  м/мин) технологических факторов ультразвуковой поверхностной обработки, 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, дробление крупных дендритов, кроме того дополнительное упрочнение обусловлено ростом микроискажений кристаллической решетки. Эффективность 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.

Исследования ультразвуковой обработки на свойства наплавленного слоя показали возможность получения благоприятной эпюры остаточных напряжений, увеличения твердости и микротвердости поверхности обработанных ультразвуком образцов, получения оптимальной микроструктуры поверхностного слоя наплавленного металла. На оптимальных параметрах процесса при базовой твердости наплавленного металла 64 HRC возможно ее увеличение на 1-2 HRC, что является резервом повышения эксплуатационных характеристик наплавленных валков холодной прокатки.

Промышленные испытания показали, что изготовленные с применением комплексных

технологий упрочнения на базе плазменной наплавки активного слоя теплостойкими сталями высокой твердости наплавленные детали обладают повышенной (в 1,5 – 2,0 раза) стойкостью по сравнению со стойкостью серийных изделий

Таким образом, установлено, что основой упрочнения теплостойкого наплавленного металла при применении комплексных технологий являются новые способы многослойной плазменной наплавки в среде азота и новые наплавочных материалов, обеспечивающих получение наплавленного металла в состоянии, близком к закаленному состоянию с твердостью поверхности 55 – 57 HRC и низкой склонностью к образованию холодных трещин. Основной дополнительный вклад в упрочнение наплавленного сплава вносит высокотемпературный отпуск при температуре 560 – 580 °С (8 - 10 HRC) и ультразвуковая обработка на оптимальных режимах ( $P_n = 10$  Н,  $A = 20$  мкм,  $V = 20$  м/мин), что обеспечивает общее увеличение твердости до 65 – 66 HRC.

#### Библиографический список

1. Гольдштейн М.И. Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М.: МИСИС, 1999. – 408 с.
2. Геллер Ю.А. Инструментальные стали / Ю.А. Геллер. – М.: Металлургия, 1975. – 584 с.
3. Фрумин И.И. Автоматическая электродуговая наплавка / И.И. Фрумин. – Харьков: Metallurgizdat, 1961. – 421 с.
4. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б.Е. Патона. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
5. 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. Валув. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 358 с.
6. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов / О.А. Кайбышев. – М.: Металлургия, 1995. – 280 с.
7. Малушин Н.Н. 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. Башенко, А.П. Ковалев//Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2021. Т. 18, № 2. С. 180–187
8. Малушин Н.Н. Технология изготовления прокатных валков плазменной наплавкой теплостойкими сталями высокой твердости. – В кн.: Влияние высокоэнергетических воздействий на структуру и свойства конструкционных материалов. Серия «Фундаментальные проблемы современного материаловедения». В 2-х т. Т.2 /Под ред. В.Е. Громова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2013. С. 290 – 297.
9. Пат. № 2699488 РФ. Способ многослойной наплавки теплостойкими сталями высокой твердости в азотсодержащей среде / Н.Н. Малушин, Д.А. Романов, В.Л. Осетковский, А.П. Ковалев, Е.А. Будовских, Д.В. Валув. заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО Сибирский гос. индустриальный университет. Заявл. 29.02.2019; опубл. 05.09.2019. Бюл. № 25.
10. Малушин Н.Н. 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. Башенко // Известия высших учебных заведений. Физика. 2019. Т. 62. № 10 (742). С. 106 – 111.