ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ЗАГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

(кузнечно-прессовое, литейное и другие производства)

Издается с января 2003 г.

Том 21 № 2 февраль 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

Литейное и сварочное производства

Монастырский В.П., Бессонов В.А., Комарова Е.В. Опыт применения новой модели пористости СКМ ЛП "ПолигонСофт" для прогнозирования усадочных дефектов в отливках 51

Малушин Н.Н., Громов В.Е., Романов Д.А., Бащенко Л.П., Ковалев А.П., Перегудов О.А. Экономнолегированные порошковые проволоки и способ их многослойной плазменной наплавки в среде азота 58

Кузнечно-штамповочное производство

Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Повышение качества изделий при выдавливании стаканов из спеченных порошковых заготовок на железной основе 64

Семёнов И.Е. Экспериментальное определение отношения поперечных и продольных деформаций (коэффициента Пуассона) при осадке длинных полос 72

Прокатно-волочильное производство

Поворов С.В., Волгин Д.С., Мунтин А.В. Влияние предела текучести холоднокатаной стали 08пс на дефект кромковой волнистости при производстве гнутых профилей на профилегибочных станах 78

Материаловедение и новые материалы

Кутепов С.Н. Закономерности изменения физико-механических и коррозионных свойств термоупрочненной арматурной стали 20ГС2 82

Информация

Столяров Ф.А., Гун И.Г., Вахитов А.Р., Смирнов А.В., Полякова М.А. Определение граничных условий конечно-элементного моделирования процесса холодной листовой штамповки 90

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: 10.36652/1684-1107-2023-21-2-58-63

Экономнолегированные порошковые проволоки и способ их многослойной плазменной наплавки в среде азота

Николай Николаевич Малушин[1], *канд. 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], **Олег Александрович Перегудов**[6], *канд. техн. наук*
[1, 2, 3, 4, 5] *Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, gromov@physics.sibsiu.ru*✉
[6] *Омский государственный технический университет, Омск, Россия*

Аннотация. Разработаны способ и составы порошковых проволок для многослойной плазменной наплавки теплостойкими сталями высокой твердости (типа стали Р2М9Ю), дополнительно легированными азотированным феррохромом и титаном. Способ наплавки с низкотемпературным подогревом и наплавочные материалы предотвращают образование трещин в процессе наплавки и обеспечивают твердость наплавленного металла до 59...60 HRC без дополнительной термической обработки. Установлено, что в наплавленном металле основными фазами являются твердый раствор α-железа, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, хрома, молибдена, алюминия и титана.

Ключевые слова: способ многослойной плазменной наплавки, регулируемый термический цикл, низкотемпературный подогрев, порошковая проволока, азот, титан, твердость, теплостойкие сплавы

Для цитирования: Экономнолегированные порошковые проволоки и способ их многослойной плазменной наплавки в среде азота / Н.Н. Малушин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Бащенко, А.П. Ковалев, О.А. Перегудов // Заготовительные производства в машиностроении. 2023. Т. 21, № 2. С. 58—63. DOI: 10.36652/1684-1107-2023-21-2-58-63.

Original article

Economically alloyed powder wires and method their multilayer plasma surfacing in nitrogen medium

Nikolay N. Malushin[1], **Viktor E. Gromov**[2]✉, **Denis A. Romanov**[3], **Lyudmila P. Bashchenko**[4], **Andrey P. Kovalev**[5], **Oleg A. Peregudov**[6]
[1, 2, 3, 4, 5] *Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, gromov@physics.sibsiu.ru*✉
[6] *Omsk State Technical University, Omsk, Russia*

Abstract. A method and powder wires are developed for multilayer plasma surfacing with heat-resistant high-hardness steels such as R2M9Yu steel additionally alloyed by nitrided ferrochrome and titanium. The surfacing method with low temperature heating and surfacing materials prevent the formation of cracks during the surfacing process and ensure the hardness of the deposited metal up to 59...60 HRC without additional heat treatment. It is established that the main phases in the deposited metal are a solid solution of α-iron, carbides and carbonitrides based on iron, tungsten, chromium, molybdenum, aluminum and titanium.

Keywords: multilayer plasma surfacing method, adjustable thermal cycle, low-temperature heating, powder wire, nitrogen, titanium, hardness, heat-resistant alloys

Введение. Теплостойкие быстрорежущие сплавы обладают высокими твердостью и износостойкостью и находят широкое применение в качестве наплавочных материалов для упрочнения деталей машин и механизмов, работающих в условиях абразивного износа и высоких температур.

В процессе наплавки и охлаждения наплавленных теплостойкими сплавами деталей образуются холодные трещины. Для предотвращения их образования в технологии наплавки обязательно применяют высокотемпературный предварительный и сопутствующий подогрев и замедленное охлаждение изделия.

При использовании данной технологии удается избежать образования трещин, но образуются пластичные продукты распада аустенита с низкой твердостью и износостойкостью. Для увеличения твердости и износостойкости наплавленные детали подвергают сложной термической обработке, которая не всегда возможна, а для многих крупногабаритных изделий и трудно осуществима [1, 2].

Для предотвращения образования холодных трещин в Сибирском государственном индустриальном университете разработаны способы наплавки теплостойкими сплавами высокой твердости, претерпевающими фазовые превращения. Для борьбы с холодными трещинами предложено использовать эффект повышенной пластичности в момент протекания мартенситного превращения [3, 4] и регулируемый низкотемпературный подогрев с температурой подогрева 200...240 °С.

Обработка деталей плазменной наплавкой теплостойкими сплавами в азотсодержащей среде позволила получить активный слой в закаленном состоянии без трещин, с низким уровнем остаточных напряжений и обеспечить равномерную твердость 54...57 HRC. Для увеличения твердости до 62...64 HRC применяют четырехкратный отпуск при температуре 560...580 °С [2, 5—8]. Применение высокотемпературного отпуска после наплавки снижает производительность и усложняет процесс изготовления наплавленных деталей.

Цель работы — совершенствование способа многослойной плазменной наплавки экономнолегированными теплостойкими сплавами в защитно-легирующей среде азота и разработка составов порошковых проволок для его реализации при упрочнении деталей горно-металлургического оборудования.

Методика проведения исследований. Для изготовления наплавленных деталей предложено использовать плазменную наплавку как способ нанесения износостойких покрытий, что объясняется рядом ее преимуществ перед другими способами наплавки: высокая производительность, широкая возможность легирования наплавленного металла, применение различных наплавочных металлов, большой диапазон регулирования ввода теплоты в основной и наплавляемый металлы. Плазменная наплавка является высококонцентрированным источником нагрева и позволяет реализовать на практике первую стадию термического цикла, положенного в основу разработанных способов наплавки [2, 5—8].

Степень ионизации газа в сжатых дугах в зависимости от давления и температуры составляет 1...10 %, а температура — 5000...30 000 °С. Основные характеристики сжатой дуги как источника тепла — ее эффективная тепловая мощность, которая определяет количество теплоты, вводимое в изделие за единицу времени, и распределение теплового потока по пятну нагрева. Эффективный КПД нагрева плазменной дуги 70...80 %.

Распределение плотности теплового потока сжатой дуги по пятну нагрева достаточно хорошо описывается законом нормального распределения Гаусса. Коэффициент сосредоточенности теплового потока возрастает с уменьшением диаметра и увеличением длины формирующего канала плазмообразующего сопла плазмотрона, поскольку при этом происходит сжатие столба дуги.

Распределение теплового потока в пятне нагрева сжатой дуги во многом определяет ее технологические особенности, область применения, существенно влияет на размеры температурного поля, геометрию наплавляемого валика, глубину проплавления основного металла, величину зоны структурных превращений. При наплавке в этой области развиваются процессы, в результате которых формируются свойства основного и наплавленного металлов, размеры зоны сплавления основного металла с наплавленным. Эти процессы в значительной степени влияют на кристаллизацию наплавленного сплава, диффузионные процессы, образование прослоек, рост зерна аустенита.

Использование сжатой дуги обратной полярности позволяет проводить очистку наплавляемой поверхности от загрязнений в процессе наплавки вследствие эффекта катодного распыления, что обеспечивает необходимые условия смачиваемости поверхности изделия наплавляемым металлом и бездефектное формирование наплавленного слоя. При наплавке на обратной полярности достигается и меньшее разбавление наплавляемого металла основным, что позволяет уменьшить количество наплавляемых слоев [2, 5—8].

Для упрочнения поверхностного слоя деталей разработан технологический процесс

плазменной наплавки на обратной полярности нетоковедущей порошковой проволокой в защитно-легирующей среде азота, оборудование для его реализации и экономнолегированные наплавочные порошковые проволоки.

Технология изготовления наплавленных деталей: механическая обработка заготовки под наплавку, плазменная наплавка, отпуск наплавленной детали, окончательная механическая обработка, контроль качества активного слоя.

Наплавку заготовок осуществляли на установке для плазменной наплавки тел вращения по термическому циклу с низкотемпературным предварительным и сопутствующим подогревом, временным снижением температуры подогрева и выдержкой при этой температуре. Детали наплавляли плазменной дугой с подачей в хвостовую часть сварочной ванны нетоковедущей присадочной порошковой проволоки ПП-Р2М9Ю. В качестве плазмообразующего газа использовали аргон, в качестве защитного газа — азот.

Режим наплавки [2, 5—9]: 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 и проводили наплавку первого слоя, после этого охлаждали шейки валка холодной водой. 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, ультразвуковой и магнитной дефектоскопии не обнаружены. Качество наплавленной поверхности удовлетворительное [2, 5, 6].

Исследования твердости и структуры экономнолегированного наплавленного сплава Р2М9Ю проводили 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 — железо [5—12]. В качестве основы использовали прокат из низколегированной стали 30ХГСА, обладающей хорошей свариваемостью и высокими механическими свойствами.

Из наплавленных заготовок анодно-механической резкой вырезали диски, из которых электроискровой резкой вырезали образцы. Далее эти образцы разрезали на электроискровом станке на параллельные пластинки толщиной 0,25...0,30 мм. Подготовку поверхности образцов проводили в два этапа: сначала выравнивали на мелкой наждачной бумаге и алмазной пасте, после этого электролитическим способом стравливали деформированный слой и выравнивали поверхность. Для электрополировки использовали электролит: 80 мл H_3PO_4 + 6 г Cr_2O_3 + 14 мл H_2O. Режим электрополировки: плотность тока 0,4...0,8 А/см^2; напряжение на электродах 40...60 В. Травление поверхности образцов осуществляли в 2%-ном растворе азотной кислоты [5—12].

Исследования наплавленного металла проводили методом растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа на приборе Leo EVO 50XVP (Carl Zeiss, Германия) [5—12].

Результаты исследований и их обсуждение. Стойкость металла против образования холодных трещин можно в определенных пределах изменять, регулируя нарастание в нем при охлаждении временных сварочных напряжений. Наиболее простой и надежный способ такого регулирования состоит в выборе химического состава наплавленного металла путем изменения состава шихты порошковой проволоки, химический состав которой определяет коэффициент линейного расширения, характер и объемный эффект структурных превращений. Эти факторы существенно влияют на развитие временных напряжений в процессе наплавки и образование холодных трещин.

При исследовании эффекта повышенной пластичности теплостойких сплавов отмечено, что степень легирования оказывает известное влияние на релаксацию временных напряжений. Выдвинуто предположение о возможности регулирования остаточных напряжений в результате смещения кривой формирования временных напряжений в область более низких температур за счет соответствующего легирования наплавленного металла. Временные напряжения, накопившиеся при охлаждении металла в аустенитной области, релаксируются в интервале мартенситного превращения и не получают дальнейшего развития при охлаждении до комнатной температуры [2, 5—7].

На основе проведенных исследований предложен способ многослойной наплавки в азот-

содержащей среде теплостойкими сталями высокой твердости [13], включающий в себя предварительный подогрев наплавляемой заготовки, наплавку слоев, охлаждение наплавленного слоя перед нанесением последующего, выдержку после наложения каждого слоя наплавки в течение времени $t_в$, необходимого для образования 10...30 % мартенсита, при этом перед наплавкой первого и последующих слоев осуществляют подогрев наплавляемой заготовки в течение времени $t_н$ до температуры подогрева $T_{под}$, лежащей выше температуры начала мартенситного превращения $M_н$ на 50...100 °С.

Выдержку после наложения каждого слоя наплавки осуществляют с одновременным снижением температуры подогрева наплавляемой заготовки T_1 на 20...100 °С ниже температуры мартенситного превращения. Непосредственно после наплавки последнего слоя в течение времени $t_п$ проводят высокотемпературный отпуск на наплавочной установке с температурой отпуска $T_{отп}$, находящейся в интервале температура рекристаллизации основного металла—температура отпуска наплавленного металла (рис. 1). Способ многослойной наплавки предотвращает образование трещин в процессе наплавки и позволяет увеличить твердость наплавленного металла до 59...60 HRC [13].

Для реализации способа многослойной наплавки разработана экономнолегированная порошковая проволока, шихта которой содержит углерод, хром, молибден, вольфрам, ванадий, алюминий, железо, никель, пыль электрофильтров алюминиевого производства [14]. Для устранения пористости, вызванной азотным кипением, в состав шихты порошковой проволоки

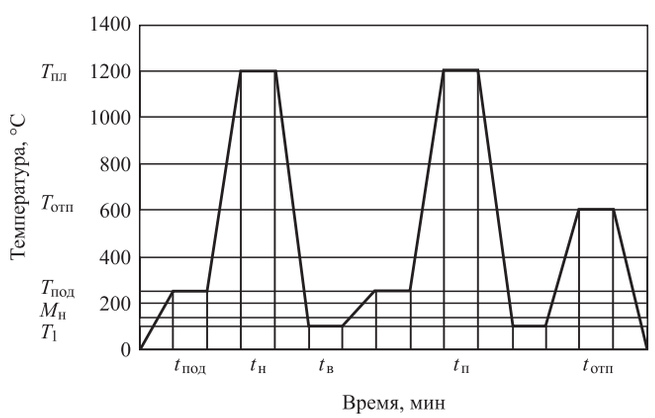

Рис. 1. Схема термического цикла многослойной плазменной наплавки с низкотемпературным подогревом и высокотемпературным отпуском

вводили алюминий, связывающий избыточный азот в нерастворимые в жидком металле соединения. Для уменьшения склонности к порообразованию, вызванному водородом, дополнительно вводили пыль фильтров алюминиевого производства. Высокие твердость и износостойкость рабочих поверхностей обеспечиваются дополнительным легированием наплавленного металла азотом из газовой фазы непосредственно в процессе наплавки (до 0,06...0,08 % N).

В состав шихты дополнительно введен азотированный феррохром. Порошковая проволока обеспечивает получение наплавленного металла типа сплава Р2М9ЮА [14].

Замена хрома на азотированный феррохром позволяет повысить содержание азота в наплавленном металле в 1,5...2,0 раза от 0,02...0,04 % N при наплавке в азотсодержащей среде до 0,06...0,08 % N. Введение в состав наплавленного металла сильного стабилизатора аустенита азота повышает количество остаточного аустенита и уменьшает объемный эффект мартенситного превращения, что снижает вероятность образования холодных трещин. Введение азотированного феррохрома в состав шихты позволяет увеличить количество карбонитридной фазы, нерастворимых мелкодисперсных нитридов и карбонитридов. Азот, увеличивая количество карбонитридной фазы и устойчивость против обратимого разупрочнения, повышает твердость на 1...2 HRC и износостойкость. Для изготовления шихты порошковой проволоки использовали феррохром низкоуглеродистый азотированный марок ФХН400А и ФХН600А, содержащий не менее 60...65 % Cr и не менее 4,0...6,0 % N (ГОСТ 4757—91).

Разработана шихта экономнолегированной порошковой проволоки для плазменной наплавки, отличающаяся от описанной выше тем, что она дополнительно содержит титан [15], что позволяет повысить содержание азота в наплавленном металле от 0,06...0,08 до 0,09...0,12 %. Комплексное легирование наплавленного металла азотом при плазменной наплавке в азотсодержащей защитно-легирующей среде, введение азотированного феррохрома, наличие алюминия в шихте порошковой проволоки и дополнительное введение в ее состав титана позволяют увеличить твердость, износостойкость и теплостойкость. Введение в состав наплавленного металла сильного стабилизатора аустенита титана повышает количество остаточного

аустенита и уменьшает объемный эффект мартенситного превращения, что снижает вероятность образования холодных трещин.

Введение титана в состав шихты позволяет дополнительно увеличить количество дисперсных нитридов алюминия и титана, которые не растворяются даже при высоком нагреве и дополнительно задерживают рост зерна аустенита, повышая теплостойкость наплавленного металла. При отпуске азот выделяется из мартенсита, образует нерастворимые мелкодисперсные нитриды алюминия и титана, а также карбонитриды других легирующих элементов, при этом увеличиваются твердость, износостойкость и теплостойкость.

Твердость наплавленного металла возрастает на 1...2 HRC, но при этом значительно повышаются износостойкость и теплостойкость (на 25...50 °С). Износостойкость улучшается из-за увеличения количества выделяющихся фаз-упрочнителей (нитридов титана).

Для изготовления шихты порошковой проволоки использовали содержащий не менее 70 % титана ферротитан Фти70 (ГОСТ 4761—91). Порошковая проволока обеспечивает получение наплавленного металла теплостойкой стали высокой твердости (типа Р2М9ЮАТ) [14]. Порошковые проволоки предназначены для плазменной наплавки в среде азота деталей машин и механизмов, работающих в условиях абразивного износа.

Влияние химического состава порошковых проволок и способа их наплавки на твердость наплавленного металла представлено на рис. 2. Сравниваются четыре варианта технологии плазменной наплавки в среде азота разными порошковыми проволоками: 1 — наплавка проволокой ПП-Р2М9Ю; 2 — наплавка проволокой ПП-Р2М9ЮА; 3 — наплавка проволокой ПП-Р2М9ЮТ; 4 — наплавка по разработанному способу проволокой ПП-Р2М9ЮАТ.

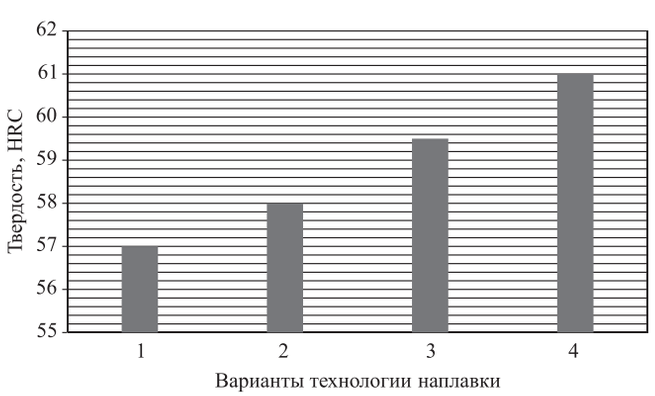

Рис. 2. Влияние химического состава порошковых проволок и способа наплавки на твердость наплавленного металла

Плазменная наплавка в среде азота проволокой ПП-Р2М9Ю обеспечивает без применения термической обработки твердость до 57 HRC, проволока ПП-Р2М9ЮА с азотированным феррохромом — твердость до 58 HRC, дополнительно легированная титаном проволока ПП-Р2М9ЮТ — до 59 HRC. Наплавка по разработанному способу экономнолегированными проволоками позволяет получать твердость 59...60 HRC.

Проведенные исследования [5—12] структурно-фазового состояния экономнолегированного теплостойкого сплава высокой твердости, сформированного многослойной плазменной наплавкой в среде азота, позволили установить, что в наплавленном металле основными фазами являются твердый раствор α-железа, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, молибдена, хрома, алюминия и титана.

Как видно из анализа рис. 3, многослойная плазменная наплавка в защитно-легирующей среде азота экономнолегированными теплостой-

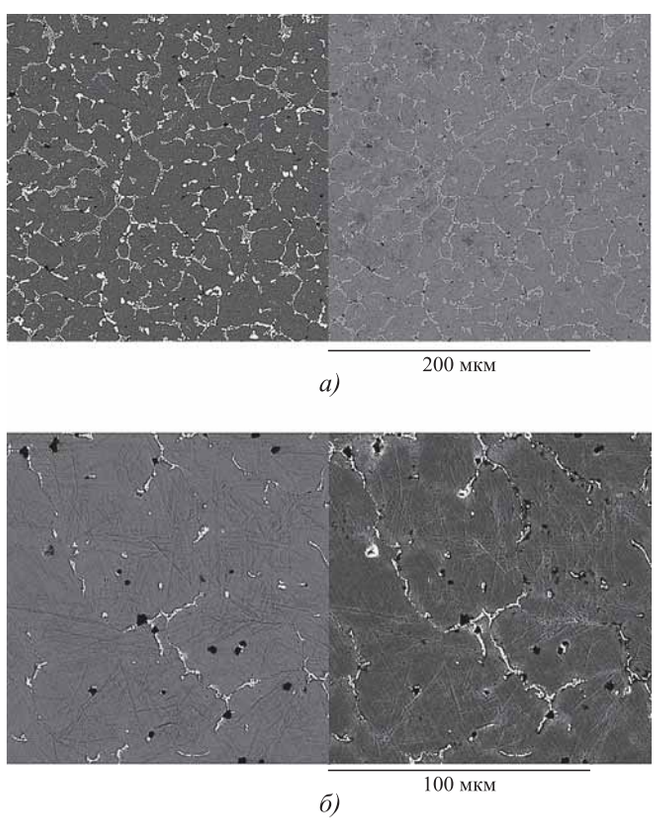

Рис. 3. Структуры наплавленного металла зоны сплавления основного металла с наплавленным металлом со стороны основного металла (*а*) и зоны сплавления основного металла с наплавленным металлом со стороны наплавленного металла (*б*) в состоянии после наплавки (структура во вторичных (слева) и в отраженных (справа) электронах)

кими сплавами высокой твердости позволяет получать качественный наплавленный слой без трещин, пор и дефектов макро- и микроструктуры. Износостойкость наплавленных деталей горно-металлургического оборудования (роликов дробилок) возрастает в 1,5—2,0 раза [5, 6].

Заключение. Разработан способ многослойной наплавки теплостойкими сплавами с низкотемпературным подогревом и высокотемпературным отпуском, который позволяет предотвратить образование трещин в процессе наплавки и повысить твердость наплавленного металла до 59...60 HRC.

Разработаны экономнолегированные порошковые проволоки для плазменной наплавки в среде азота, шихта которых содержит углерод, хром, вольфрам, молибден, алюминий, никель, пыль фильтров алюминиевого производства, азотированный феррохром и титан. Термический цикл многослойной наплавки и комплексное легирование наплавленного металла позволяют получить металл, не склонный к образованию трещин в закаленном состоянии.

Установлено, что в наплавленном материале основными фазами являются твердый раствор α-железа, карбиды и карбонитриды на основе железа, вольфрама, молибдена, хрома, алюминия и титана.

Результаты промышленных испытаний свидетельствуют о возможности применения предложенного способа плазменной наплавки и материалов для упрочнения наплавленных деталей горно-металлургического оборудования.

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. **Малушин Н.Н.** Физические основы комплексной технологии упрочнения теплостойких сплавов высокой твердости, сформированных плазмой в среде азота: специальность 01.04.07: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Малушин Николай Николаевич. Новокузнецк, 2021. 289 с.

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. **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.

9. **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.

10. **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.

11. **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.

12. **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.

13. **Патент № 2699488 Российская Федерация.** 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.

14. **Патент № 26344526 Российская Федерация.** 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.

15. **Патент № 2681049 Российская Федерация.** 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.

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; одобрена после рецензирования 05.12.2022; принята к публикации 05.12.2022.

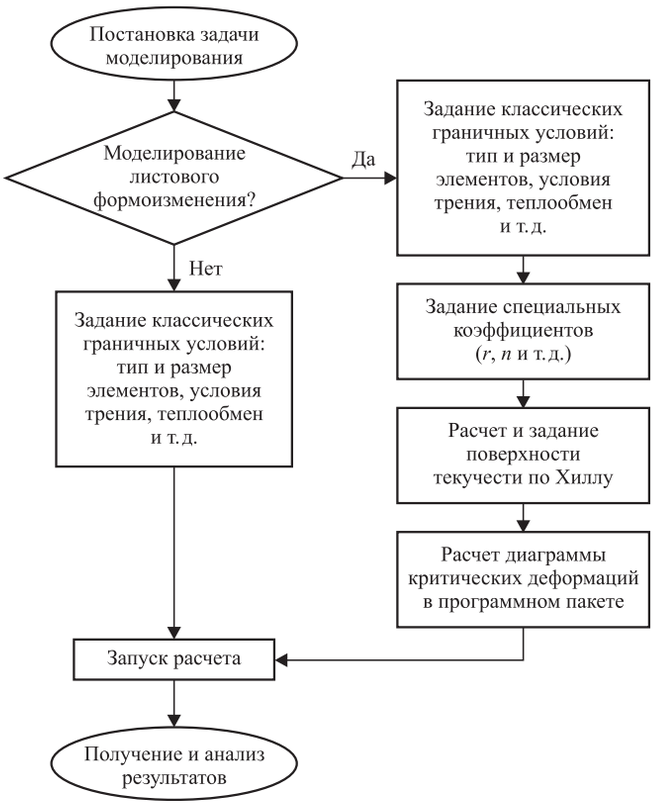

Рис. 3. Предлагаемый алгоритм задания граничных условий конечно-элементного моделирования листовой штамповки

На основе предложенного алгоритма были заданы граничные условия и проведено конечно-элементное моделирование процесса вытяжки и отбортовки рычага передней подвески из высокопрочной стали S420MC. На рис. 4 (см. обложку) представлена конечно-элементная модель расчета утонений и штампуемости детали.

Заключение. Характеристики, измеренные и определенные экспериментальным и аналитическим путем, позволят повысить точность задания граничных условий конечно-элементной модели, что повлечет увеличение точности моделирования и соответствия реальному процессу листовой штамповки. Обобщены имеющиеся в открытых источниках данные по напряженно-деформированному состоянию в процессе листовой штамповки, а также предложен алгоритм задания граничных условий конечно-элементного моделирования листового формоизменения. Единый подход к назначению граничных условий конечно-элементной модели позволит моделировать процесс холодной листовой штамповки с высокой точностью для достижения заданного уровня качества автокомпонентов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Heißing B., Ersoy M.** Chassis Handbook: Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. Wiesbaden: Vieweg, Teubner, 2011. 616 p.

2. **Расчетное** определение усилия начала пластической деформации при изгибе пальца шарового наружного рулевого наконечника автомобиля посредством моделирования процесса статических испытаний / И.Г. Гун, А.Р. Вахитов, Ф.А. Столяров [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т. 19, № 2. С. 23—31. DOI: 10.18503/1995-2732-2021-19-2-23-31.

3. **McAllen P., Phelan P.** A method for the prediction of ductile fracture by central bursts in axisymmetric extrusion // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 2016. Vol. 219, no. 3. P. 237—250.

4. **Мамутов В.С., Мамутов А.В.** Компьютерное моделирование процессов листовой штамповки. учебное пособие. Санкт-Петербург, 2016. 192 с.

5. **BS EN 10149-2.** Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming. Part 2: Technical delivery conditions for thermomechanically rolled steels. 2013. 17 p.

6. **Bleck W., Frehn A.** Material investigation on the hot rolled microalloyed steels S355MC, S420MC. Department of Ferrous Metallurgy (IEHK) RWTH Aachen. 2003. P. 1—15.

7. **Луканова Е.О., Евсюков С.А.** Анализ напряженного состояния при совмещении раздачи, обжима, вытяжки и отбортовки // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 3. С. 335—342.

8. **Шамбина С.Л.** Варианты поквадрантной записи критерия Мизеса—Хилла для анизотропных материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2007. № 3. С. 57—61.

9. **Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю.** Технология холодной штамповки: учебник для вузов по специальностям "Машины и технология обработки металлов давлением" и "Обработка металлов давлением". Москва: Машиностроение, 1989. 304 с.

10. **Paul S.K.** Theoretical analysis of strain- and stress-based forming limit diagrams // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2013. Vol. 48, no. 3. P. 177—188.

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; одобрена после рецензирования 05.12.2022; принята к публикации 05.12.2022.

ООО "Издательство "**Инновационное машиностроение"**, 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение". **E-mail: zpm@mashin.ru**
Тел. редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96. http://www.mashin.ru
Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 29.12.2022. Подписано в печать 10.02.2023. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет: ИП Яланский В.В.
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.