

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) **ВУ** (11) **24895**

(13) **С1**

(45) **2026.04.20**

(51) МПК

В 22D 19/08 (2006.01)

(54) СПОСОБ НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ВНУТРЕНнюю ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ДЕТАЛИ

(21) Номер заявки: а 20250100

(22) 2025.05.19

(71) Заявитель: Государственное научное учреждение "Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси" (ВУ)

(72) Авторы: Белоцерковский Марат Артемович; Комаров Александр Иванович; Сосновский Игорь Александрович; Орда Дмитрий Владимирович; Куриленок Артем Александрович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Государственное научное учреждение "Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси" (ВУ)

(56) ВУ 23365 С1, 2021.

RU 2338007 С2, 2008.

ВУ 21351 С1, 2017.

SU 1690948 А1, 1991.

(57)

Способ нанесения металлического покрытия на внутреннюю цилиндрическую поверхность детали, при котором в полость цилиндрической заготовки помещают шихту, состоящую из цинк-алюминиевого сплава и флюса, осуществляют вращение детали вокруг собственной оси с частотой $1600-2500 \text{ мин}^{-1}$ с одновременным ступенчатым индукционным нагревом токами высокой частоты до температуры на $150-300^\circ\text{C}$ выше температуры плавления цинк-алюминиевого сплава и последующей изотермической выдержкой при этой температуре в течение 5-15 мин, причем при изотермической выдержке осуществляют циклическое изменение частоты вращения детали в диапазоне $400-2500 \text{ мин}^{-1}$ с периодичностью 0,5-2,0 цикла в минуту, при этом количество циклов составляет не менее 5, затем осуществляют ускоренное охлаждение детали до температуры на $150-200^\circ\text{C}$ ниже температуры плавления цинк-алюминиевого сплава.

Изобретение относится к области технологии машиностроения и может быть использовано для изготовления или восстановления деталей машин, в частности вкладышей подшипников скольжения с антифрикционным слоем из алюминий-цинкового сплава на внутренней цилиндрической поверхности.

В настоящее время большой интерес представляют подшипники скольжения, имеющие композиционное строение с градиентной структурой покрытия. Покрытия формируются из антифрикционных сплавов с формированием промежуточного слоя или без него. Детали с такими покрытиями с подобной структурой обладают антифрикционными свойствами.

В [1] предложен способ высокоскоростного газопламенного напыления многослойного покрытия из порошковых материалов на металлическое изделие в защитной атмосфере, включающий предварительную механическую активацию порошков, нанесение нижнего слоя из механически активированного порошка, среднего слоя из механически активированного порошка с эффектом памяти формы на основе TiNiZr и верхнего слоя из механически активированной смеси порошков, отжиг, при этом нижний слой наносят из механически активированного порошка на основе TiNi эквиатомного состава толщиной 1000-1500 мкм, при комнатной температуре в аустенитном состоянии, верхний слой наносят из механически активированной смеси порошков следующего состава, мас. %: cNB 62-74; Co 6-10; Mo 8-10; TiNi 6-8; TiNiZr 6-10, толщиной 200-600 мкм.

После напыления нижнего слоя проводят комплексную обработку, включающую поверхностно-пластическую деформацию и контактную точечную сварку, а после нанесения среднего и верхнего слоев осуществляют комбинированную обработку поверхностно-пластического деформирования и ультразвукового упрочнения, при этом проводят отжиг при температуре 500-700 °С в течение 3-4 ч в защитной атмосфере аргона. Отжиг проводится для снятия внутренних напряжений после формирования многослойного композитного покрытия.

К недостаткам данного способа следует отнести необходимость высокотехнологичного оборудования для комбинированного нанесения порошков, а также невысокий коэффициент использования порошков при газопламенном напылении. Также способ ограничен для нанесения покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей.

В способе [2] представлена технология индукционного упрочнения и восстановления деталей, согласно которому на поверхность детали наносят шихту, содержащую карбид бора, фторид натрия, буру, сормайттовую крупку, толщиной слоя 0,5-5,0 мм при следующем соотношении компонентов, мас. %: карбид бора 25-35; фторид натрия 1-3; бура 9-12; сормайттовая крупка 50-65. Нагрев производят токами высокой частоты до оплавления поверхности нанесенной шихты и образования на поверхности наплавленного слоя стеклообразной шлаковой корочки, после чего деталь с наплавленным слоем охлаждают на воздухе до температуры ниже 200 °С и удаляют стеклообразную шлаковую корочку с поверхности наплавленного слоя.

Недостатками вышеописанного способа являются необходимость строгого контроля толщины наносимой на поверхность детали шихты, а также технологических параметров наплавки во избежание "сползания" наплавленного металла или поверхности изделия, что чревато наличием неметаллических включений на границе сплавления и слабой адгезией наплавленного слоя к восстанавливаемой поверхности. Кроме того, он не предназначен для нанесения покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей.

В [3] предложен способ изготовления биметаллических втулок и подшипников скольжения с антифрикционным слоем баббита центробежным методом. Способ включает изготовление стальной заготовки, покрытие ее внутренней поверхности флюсом (мас. %: $ZnCl_2$ - 70, $SnCl_2$ - 28, $CuCl_2$ - 2), засыпку наплавочного материала, герметизацию заготовки с помощью двух технологических крышек, закрепление в центрах установки для биметаллизации, придание вращения заготовке, индукционный нагрев током высокой частоты, изотермическую выдержку и охлаждение. Обеспечивается повышение качества наплавленного слоя при биметаллизации втулок за счет равномерного нагрева, полного расплавления шихты по длине заготовки и контроля режимов нагрева.

Нагрев заготовки осуществляют с помощью генератора токов высокой частоты, передачу мощности от которого к нагреваемому объекту осуществляют с помощью многovitкового цилиндрического индуктора. А для обеспечения максимального коэффициента полезного действия геометрические размеры индуктора рассчитывают с учетом требований минимальной величины зазора между индуктором и нагреваемым объектом.

Данный способ позволяет наносить покрытия на внутренние цилиндрические поверхности деталей. Недостатком данного способа является плохая смачиваемость стали баббитами, что компенсируется использованием специальных флюсов (мас. %: ZnCl_2 - 70, SnCl_2 - 28, CuCl_2 - 2), что приемлемо только для баббитов и ограничивает применение способа. При этом для обеспечения максимального коэффициента полезного действия требуется изготовление многovitковых цилиндрических индукторов под размер обрабатываемой детали для обеспечения минимальной величины зазора.

Наиболее близким к предлагаемому изобретению является способ [4] нанесения двухслойного покрытия из алюминия или алюминиевого сплава с металлическим подслоем на внутреннюю поверхность цилиндрической детали, включающий помещение в полость детали шихты, состоящей из алюминия или алюминиевого сплава, материала подслоя и флюса, ступенчатый нагрев детали токами высокой частоты при одновременном вращении детали в диапазоне $1600\text{-}2500 \text{ мин}^{-1}$, после чего осуществляют ускоренное охлаждение детали от температуры плавления алюминия или алюминиевого сплава до температуры, ниже на $150\text{-}200^\circ\text{C}$ температуры плавления материала подслоя, при этом материал подслоя выбирают с более высокой плотностью и меньшей температурой плавления в сравнении с наплавляемым алюминием или алюминиевым сплавом. При этом, согласно предлагаемому способу, в качестве материала подслоя могут быть использованы свинец (Pb), олово (Sn), цинк (Zn) или их сплавы.

Формирование покрытия из алюминия или алюминиевого сплава осуществляется в поле центробежных сил, под действием которых материал шихты равномерно распределяется на внутренней поверхности заготовки.

Данный способ предусматривает нанесение покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей. Однако одним из недостатков данного способа является отсутствие перемешивания материала покрытия, что приводит к неоднородности наплавленного покрытия, формирование которого происходит из кусковой шихты, что негативно сказывается на качестве покрытия.

Задачей изобретения является улучшение качества получаемого покрытия за счет перемешивания расплава в процессе наплавки и формирования композиционного покрытия с градиентной структурой, на основе алюминий-цинкового сплава, на внутренней цилиндрической поверхности деталей машин с обеспечением высокой прочности сцепления с основой и сохранением триботехнических свойств наплавляемого покрытия.

Указанная задача решается в способе нанесения металлического покрытия на внутреннюю цилиндрическую поверхность детали, при котором в полость цилиндрической детали помещают шихту, состоящую из цинк-алюминиевого сплава и флюса, осуществляют вращение детали вокруг собственной оси с частотой $1600\text{-}2500 \text{ мин}^{-1}$ с одновременным ступенчатым индукционным нагревом токами высокой частоты до температуры на $150\text{-}300^\circ\text{C}$ выше температуры плавления цинк-алюминиевого сплава и последующей изотермической выдержкой при этой температуре в течение 5-15 мин, причем при изотермической выдержке осуществляют циклическое изменение частоты вращения детали в диапазоне $400\text{-}2500 \text{ мин}^{-1}$ с периодичностью 0,5-2,0 цикла в минуту, при этом количество циклов составляет не менее 5, затем осуществляют ускоренное охлаждение детали до температуры на $150\text{-}200^\circ\text{C}$ ниже температуры плавления цинк-алюминиевого сплава.

Формирование покрытия из алюминий-цинкового сплава осуществляется в поле центробежных сил, под действием которых материал шихты равномерно распределяется на внутренней поверхности заготовки. При этом после расплавления алюминий-цинковый сплав претерпевает градиентное перераспределение по структуре: алюминий-цинковый сплав с малым содержанием алюминия смещается к стальной основе, а алюминий-цинковый сплав с повышенным содержанием алюминия смещается к поверхности.

Для удаления окисных пленок и достижения равномерности распределения покрытия по сечению заготовки в процессе изотермической выдержки осуществляют циклическое

изменение частоты вращения детали в диапазоне 400-2500 мин⁻¹ с периодичностью 0,5-2,0 цикла в минуту, при этом количество циклов составляет не менее 5.

Так, выбранный диапазон скоростей вращения цилиндрической заготовки вокруг собственной оси в процессе изотермической выдержки в диапазоне 400-2500 мин⁻¹ обеспечивает перемешивание сплава покрытия, тем самым удаляя окисные пленки и равномерно распределяя покрытия по сечению заготовки. При вращении заготовки со скоростью ниже 400 мин⁻¹ наблюдается скопление расплава в нижней части заготовки и возникает "металлический дождь", что обеспечивает активное перемешивание расплава [5], тогда как дальнейшее снижение скорости вращения не приводит к улучшению перемешивания. Вращение заготовки со скоростью более 2500 мин⁻¹ приводит к оттеснению расплава к торцам заготовки и его неравномерному распределению, что ухудшает качество покрытия заготовки.

Периодичность изменения скорости вращения в процессе изотермической выдержки необходима для смещения слоев покрытия и разрыва окисных пленок, которые связываются с частицами флюса, выводятся на поверхность наплавляемого покрытия и в дальнейшем после кристаллизации удаляются механической обработкой заготовки. Так, время успокоения расплава в полости втулки при изменении скорости вращения в среднем составляет 10 с [5]. Один цикл состоит из трех этапов изменения скорости вращения. Таким образом, за минуту можно осуществить не более 2 циклов с учетом краткосрочной выдержки при заданной скорости вращения. Снижение периодичности циклов менее 0,5 нецелесообразно, поскольку в эти периоды расплав стабилизируется и межслойное перемешивание прекращается.

Количество циклов в период изотермической выдержки следует устанавливать не менее 5, поскольку в ином случае не обеспечиваются достаточное перемешивание и удаление шлака из расплава покрытия.

Данный способ реализуется на универсальной центробежно-индукционной установке, описание и работа которой подробно приведены в [6]. При этом периодичность и количество циклов устанавливаются экспериментально при разработке и отладке технологического режима наплавки алюминий-цинкового покрытия с учетом технологических характеристик оборудования.

Сущность изобретения иллюстрируется следующими примерами.

Пример 1.

Во внутреннюю полость цилиндрической заготовки из стали 20 с наружным диаметром 70 мм, внутренним диаметром 50 мм и длиной 50 мм помещали шихту заданного состава, состоящую из сечки сплава Д16 с температурой плавления ~650 °С и плотностью 2,77 г/см³, цинкового сплава марки ЦАМ4-1 с температурой плавления 380 °С и плотностью 6,7 г/см³ и покровного флюса [7]. С торцов втулку с размещенной в ней шихтой закрывали крышками с антипригарными прокладками и закрепляли на центробежной установке. Затем заготовку приводили во вращение со скоростью 1600 мин⁻¹ и одновременно нагревали до температуры 380-400 °С индуктором токов высокой частоты установки ЛПЗ-2-67М [6], поддерживая температуру на данном уровне в течение 3 мин. Затем температуру нагрева увеличивали до 780-800 °С и поддерживали на данном уровне 6 мин. В процессе изотермической выдержки проводили циклическое изменение скорости вращения в диапазоне 400-1600 мин⁻¹, количество циклов 10 шт. и периодичность 2 цикла в минуту. После этого нагрев отключали и осуществляли ускоренное охлаждение заготовки потоком воздуха под давлением 3 МПа до температуры 200-230 °С. По достижении указанной температуры вращение прекращали, а заготовку снимали с установки и оставляли охлаждаться до комнатной температуры.

Пример 2.

Наплавку осуществляли по режимам и в очередности операций, указанных в примере 1, при этом в качестве материала для покрытия использовали сечку из сплава АК4 с тем-

пературой плавления 660 °С и плотностью 2,7 г/см³, цинковый сплав марки ЦАМ4-1, а ускоренное охлаждение заготовки проводили до температуры 230-250 °С.

Пример 3.

Во внутреннюю полость цилиндрической заготовки из стали 20 с наружным диаметром 70 мм, внутренним диаметром 50 мм и длиной 50 мм помещали шихту, состоящую из сечки сплава марки ЦАМ10-5 с температурой плавления ~380 °С и плотностью 6,3 г/см³. Дополнительно вводили покровный флюс [7]. С торцов втулку закрывали крышками с антипригарными прокладками и закрепляли на центробежной установке. Затем заготовку приводили во вращение со скоростью 1800 мин⁻¹ и одновременно нагревали до температуры 380-400 °С индуктором ТВЧ установки ЛПЗ-2-67М [6], поддерживая температуру на данном уровне в течение 3 мин. Затем температуру нагрева увеличивали до 600-650 °С и поддерживали на данном уровне 8 мин. В процессе изотермической выдержки проводили циклическое изменение скорости вращения в диапазоне 400-2000 мин⁻¹, количество циклов 14 шт. и периодичность 2 цикла в минуту. После этого нагрев отключали и осуществляли ускоренное охлаждение заготовки потоком воздуха под давлением 3 МПа до температуры 180-200 °С при скорости вращения 2000 мин⁻¹. По достижении указанной температуры вращение прекращали, заготовку снимали с установки и оставляли охлаждаться до комнатной температуры.

Полученные согласно приведенным примерам покрытия на основе алюминий-цинкового сплава имеют композиционное строение: цинк-алюминиевый сплав армированный железосодержащими интерметаллидными включениями Al₁₃Fe₄ (Al₃Fe). При этом на поверхности стальной втулки образовывается диффузионный цинковый слой толщиной до 300 мкм, структура которого имеет гетерогенное строение.

Отличительной особенностью формирования структуры после наплавки является наличие армирующих включений Al₁₃Fe₄ (Al₃Fe) в матричном сплаве, которые формируются в процессе образования и роста диффузионного слоя. Поверхность слоя растворяется, а высвободившееся при этом железо образует с Al прослойку интерметаллида, толщина которого увеличивается до некоторого критического значения, после чего интерметаллиды отслаиваются и под действием внешних сил перемещаются в объем покрытия.

Полученные согласно приведенным примерам покрытия обладают высокими триботехническими характеристиками (примеры 1, 2, 3). Подготовленные образцы испытывали в среде масла И-40А при нагрузке 5, 10, 20, 25 МПа в условиях возвратно-поступательного перемещения относительно стального контртела со скоростью 0,1 м/с. Результаты исследования коэффициента трения полученных покрытий приведены в таблице.

Коэффициент трения образцов

Номер примера	Коэффициент трения покрытия при различной нагрузке			
	5 МПа	10 МПа	20 МПа	25 МПа
1	0,010-0,018	0,010-0,012	0,005-0,008	0,014-0,016
2	0,010-0,018	0,012-0,016	0,010-0,018	0,014-0,016
3	0,012-0,016	0,006-0,015	0,012-0,020	0,010-0,020
Прототип	0,021-0,025	0,025-0,028	0,028-0,035	0,030-0,035

Источники информации:

1. RU 2671032 C1, 2017.
2. RU 2507027 C1, 2012.
3. RU 2643000 C2, 2015.
4. BY 23365, 2019.

5. BARRON M.A. et al. Analysis of Molten Metal Distribution in the Mold of a Horizontal Centrifugal Casting. Open Journal of Applied Sciences, 2020, vol. 10, pp. 444-454.

6. СОСНОВСКИЙ И.А. и др. Технология и оборудование для нанесения функциональных покрытий на детали машин центробежным индукционным методом. Научные технологии машиностроения, авиации и транспорта: сборник трудов XVI Международной научно-технической конференции. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2024, с. 649-654.

7. КУРДЮМОВ А.В. и др. Производство отливок из сплавов цветных металлов: учебник для вузов. Москва: Металлургия, 1986, 416 с.