

УДК (УДК) 629.11

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН НА
ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕМОНТА УЗЛОВ ТРЕНИЯIMPROVING THE DURABILITY OF ROAD CONSTRUCTION MACHINES BASED ON
IMPROVED REPAIR OF FRICTION KNOTSОвсянников В.Е.
Ovsyannikov V.E.Курганский государственный университет (Курган, Россия)
Kurgan State University (Kurgan, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы повышения долговечности строительно-дорожных машин. В качестве предмета исследования рассматриваются узлы трения, детали которых изготовлены из серого чугуна. На основании комплексного технико-экономического анализа методов упрочнения чугунных деталей установлено, что наилучшим сочетанием критериев обладает химико-термическая обработка. Используемые в практике методы упрочнения чугунов мало применимы в условиях ремонтного производства из-за сложности технологически процессов и оборудования. Кроме того, толщина упрочненного слоя обычно не превышает 0,3 мм. В работе рассмотрены основные аспекты применения новой технологии поверхностного упрочнения. Сформулированы рекомендации по ее применению в зависимости от служебного назначения детали. Проведена оценка технического уровня предлагаемых решений по сравнению с традиционными технологиями упрочнения чугунов.

Ключевые слова: строительно-дорожные машины, долговечность, серый чугун, трение, ремонт, упрочнение, технология

Дата принятия к публикации: 02.09.2019
Дата публикации: 25.09.2019

Сведения об авторе:

Овсянников Виктор Евгеньевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Курганский государственный университет,
e-mail: vik9800@mail.ru.
ORCID: 0000-0002-8775-0781

Abstract. The article discusses the issues of increasing the durability of road-building machines. As a subject of research, friction units are considered, the details of which are made of gray iron. On the basis of a comprehensive technical and economic analysis of hardening methods for cast iron parts, it was established that chemical-heat treatment has the best combination of criteria. The methods used in practice for hardening cast irons are of little use in the conditions of repair production due to the complexity of technological processes and equipment. In addition, the thickness of the hardened layer usually does not exceed 0.3 mm. The paper discusses the main aspects of the application of new technology of surface hardening, formulated recommendations for its use, depending on the service purpose details. An assessment of the technical level of the proposed solutions compared with traditional technologies of hardening of cast iron.

Keywords: road construction machines, durability, gray cast iron, friction, repair, hardening, technology

Date of acceptance for publication: 02.09.2019
Date of publication: 25.09.2019

Author's information:

Victor E. Ovsyannikov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department “Automation of Production Processes” at Kurgan State University, e-mail: vik9800@mail.ru.
ORCID: 0000-0002-8775-0781

1. Введение

Детали из чугуна используются в конструкциях как непосредственно строительно-дорожных машин (блоки цилиндров, маховики и т.д.), так и в различных навесных агрегатах (лебедки, подъемники, прицепное оборудование и т.д.). Долговечность таких

деталей зависит от физико-механических свойств материала и микроструктуры. Наличие графита способствует повышению сопротивляемости износу. Форма графитовых включений также влияет на эксплуатационные свойства изделий. В частности, графит пластинчатой формы, характерный для серых чугунов, снижает прочность. Также до-

полнительным ограничением в использовании серого чугуна является то, что применение традиционных методов его упрочнения (например, индукционной закалки) малоэффективно. При этом серый чугун более дешевый по сравнению с высокопрочным.

Строительно-дорожные машины работают в достаточно неблагоприятных условиях, к которым можно отнести динамические нагрузки, перепады температур, абразивную среду и т.д. К неблагоприятным факторам эксплуатации рассматриваемого парка техники можно также отнести неравномерность режима работы (более интенсивное использование в сезоны без отрицательных температур) и то, что машины зачастую эксплуатируются в удаленных районах. Это не всегда позволяет должным образом организовать процессы технического обслуживания. Все перечисленные выше обстоятельства приводят к повышенной интенсивности износа узлов машин. Поэтому перспективным направлением повышения долговечности в данном свете является поверхностное упрочнение деталей.

Среди основных методов упрочнения чугуна можно выделить следующие:

- объемная термическая обработка;
- лазерное упрочнение;
- электроконтактная обработка;
- электроискровое легирование;
- химико-термическая обработка.

Закалка серого чугуна применяется для повышения твердости. Закалка серого чугуна осуществляется при температуре 850...900°C с последующим охлаждением в воде. В результате получаемая твердость составляет примерно 450...500 НВ.

Одной из вариаций термической обработки чугуна является криогенная обработка [1]. Данный вид термической обработки применяется преимущественно для перлитных чугунов, с целью для повышения механических и эксплуатационных характеристик изделий. При помощи криогенной технологии форма включений графита не изменяется.

В результате лазерной обработки на поверхности деталей из серого чугуна появляется закаленный слой, структура которого соответствует белому чугуну [2]. Микро-

твердость зоны оплавления составляет 460...540 НВ, а зоны термического влияния - 930 НВ. С использованием лазерной закалки возможно получать толщину упрочненного слоя до 0,6 мм.

Электроконтактная технология поверхностного упрочнения чугуна [3] основана на воздействии электродов с приложением контактного давления и электрического нагрева. В результате происходит формирование слоя белого чугуна на поверхности. Толщина упрочненного слоя при этом составляет от 1 до 4 мм. Однако данная технология требует сложного оборудования, повышенного расхода энергии. Также покрытие получается неоднородным.

Химико-термическая обработка чугуна основана на термодиффузионном насыщении поверхности. К ней относятся такие виды, как азотирование, борирование, силицирование и т.д. Также может применяться комплексное насыщение поверхности несколькими легирующими элементами [4].

Сравнение технических и экономических возможностей производим на основе метода анализа иерархий [5]. В данном случае предполагается решение задачи для двух уровней иерархии по выбору из пяти альтернатив по пяти критериям.

Перечень альтернативных вариантов приведен на рис. 1, а в качестве критериев можно выделить следующие:

1. Толщина упрочненного слоя К1.
2. Управляемость процессом К2 (комплексный показатель, характеризующий требования к квалификации рабочего, простоту методики назначения режимов и сложность технологического процесса).
3. Обрабатываемость упрочненного слоя резанием К3.
4. Твердость К4.
5. Экономичность способа К5.

Полная доминантная иерархия приведена на рис. 1.

Анализ проводился с позиций применимости методов в условиях ремонтного производства. Оценка на уровне целей выполнялась последовательным парным сравнением влияния критериев K_i на показатель цели анализа (повышение долговечности деталей

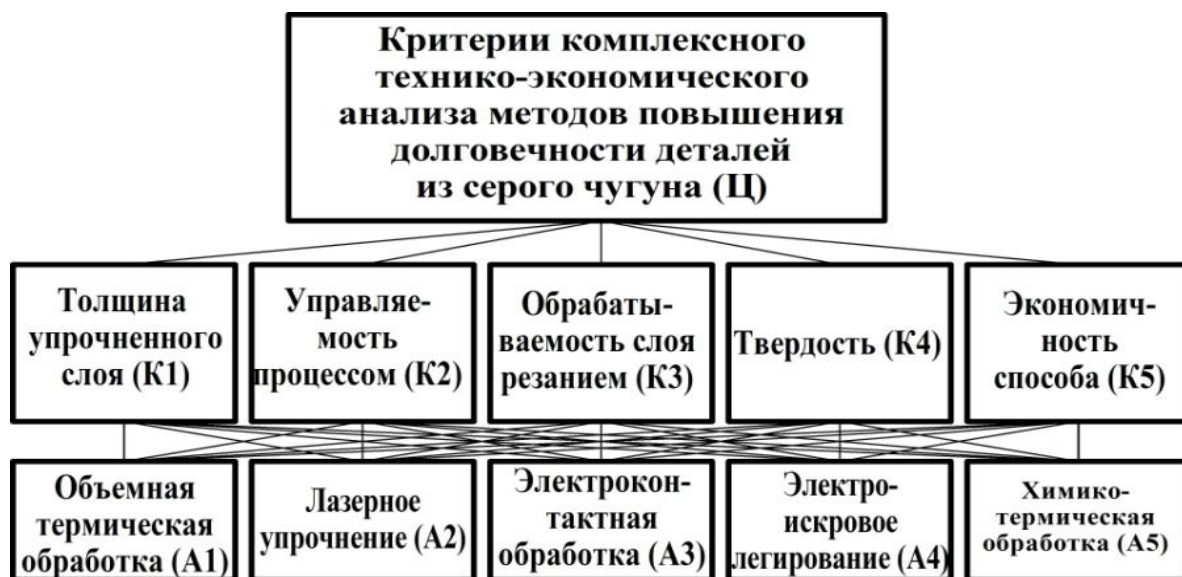


Рис. 1. Полная доминантная иерархия

из серого чугуна в условиях ремонтного производства). При анализе на уровне критериев выполнялось парное сравнение альтернатив A_i по критериям K_i . На рис. 2 приведе-

ны результаты комплексного технико-экономического анализа методов повышения долговечности деталей из серого чугуна.

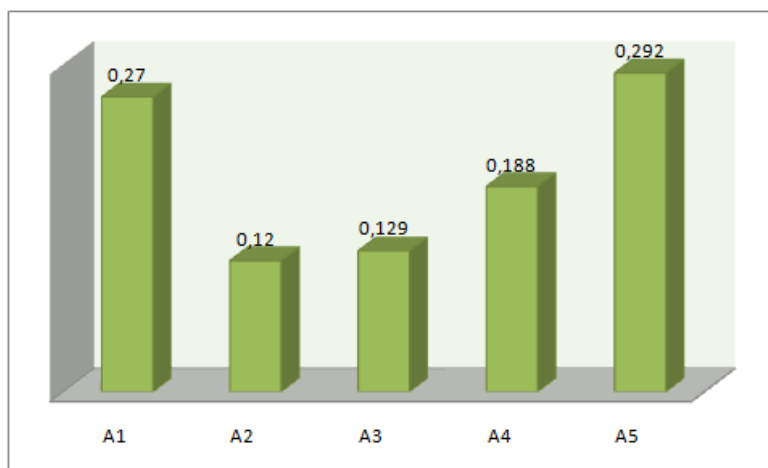


Рис. 2. Результаты комплексного технико-экономического анализа методов повышения долговечности деталей из серого чугуна

2. Цель и методы исследования

Цель выполненного исследования состояла в разработке технологии химико-термической обработки серого чугуна, которую возможно использовать в условиях ремонтного производства.

В работе [6] была доказана возможность реализации нового метода химико-термической обработки серого чугуна посредством выдержки при температурах 900...1100°C в

контакте с оксидами легирующих элементов. При этом на поверхности чугуна происходит диссоциация оксидов легирующих элементов, проникновение легирующего элемента вглубь сплава и последующая диффузия. Важным фактором, который оказывает влияние на структуру и свойства диффузионного слоя, является возможность окисления кремния и марганца основы чугуна. Если данные химические элементы будут окислены, то возможно получить диффузионный слой со

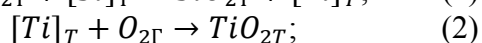
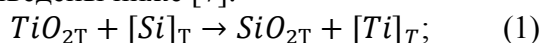
структурой, которая соответствует стали (перлит). Это в последующем позволит производить закалку диффузионного слоя.

Оценка возможности окисления марганца и кремния основы чугуна производилась на основе термодинамического анализа [7].

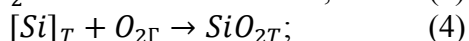
В ходе расчетов производилось определение констант равновесия и энергии Гиббса реакций в системах вида $[Fe - Si - Me]_{\text{вFe}} - Me_nO_{mT} - SiO_{2T}$ и $[Fe - Mn - Me]_{\text{вFe}} - Me_nO_{mT} - MnO_T$

Рассматривались реакции окисления кремния основы чугуна посредством взаимодействия с оксидами FeO , Cr_2O_3 , MoO_2 , V_2O_3 , TiO_2 . Определение константы равновесия реакций производилось с использованием закона Гесса [7].

Примеры расчетов констант равновесия реакций для взаимодействия с оксидом титана приведены ниже [7].



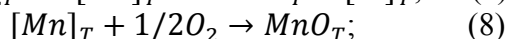
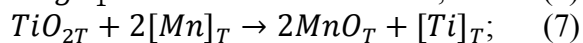
$$lgK_2 = 49050T^{-1} - 9.176; \quad (3)$$



$$lgK_4 = 47108/2T^{-1} - 8.923. \quad (5)$$

Температурная зависимость константы равновесия реакции (1) определяется как $lgK_4 - lgK_2$:

$$lgK_1 = -1941.8T^{-1} + 0.253; \quad (6)$$



$$lgK_8 = 20109.3T^{-1} - 3.849. \quad (9)$$

Температурная зависимость константы равновесия реакции (7) определяется как $2lgK_8 - lgK_2$:

$$lgK_7 = -8831.4T^{-1} - 2.371. \quad (10)$$

Теоретический расчет химического состава диффузионного слоя выполнялся на основе определения равновесных концентраций химических элементов.

В качестве материала для экспериментальных исследований был выбран феррито-перлитный серый чугун марки СЧ-20 (ГОСТ 1482-85). Термодиффузионное легирование проводили в печи с графитовым нагревателем с максимальной температурой 1100°C. Интервалы времени выдержки составляли от 2 до 8 ч. Исследование толщины слоя, а также металлографические исследования выполнялись с использованием микроскопов Neophot-21 при увеличении 200, 400, 500 и 1000 крат.

Твердость образцов измеряли посредством портативного твердомера марки ТН-130, позволяющего оценивать данное свойство по шкалам Роквелла и Викерса.

3. Результаты исследований.

Результаты расчетов констант равновесия приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значения констант равновесия и энергии Гиббса реакций окисления кремния основы чугуна

Оксид	Температура, K	LgK	ΔG, Дж
FeO	1173	14.52	-3.25·10 ⁵
	1273	13.202	-3.21·10 ⁵
	1373	12.1	-3.17·10 ⁵
Cr ₂ O ₃	1173	19.697	-4.42·10 ⁵
	1273	18.15	-4.41·10 ⁵
	1373	16.83	-4.41·10 ⁵
MoO ₂	1173	14.133	-3.167·10 ⁵
	1273	13.022	-3.168·10 ⁵
	1373	12.072	-3.168·10 ⁵
V ₂ O ₃	1173	17.105	-3.835·10 ⁵
	1273	15.061	-3.665·10 ⁵
	1373	13.306	-3.494·10 ⁵
TiO ₂	1173	-1.402	3.144·10 ⁴
	1273	-1.272	3.096·10 ⁴
	1373	-1.161	3.047·10 ⁴

Таблица 2

Значения констант равновесия и энергии Гиббса реакций окисления марганца основы чугуна

Оксид	Температура, K	LgK	ΔG , Дж
FeO	1173	4.934	$-1.106 \cdot 10^5$
	1273	4.507	$-1.097 \cdot 10^5$
	1373	4.143	$-1.087 \cdot 10^5$
Cr_2O_3	1173	2.808	$-6.295 \cdot 10^4$
	1273	2.733	$-6.649 \cdot 10^4$
	1373	2.669	$-7.003 \cdot 10^4$
MoO_2	1173	9.484	$-2.126 \cdot 10^5$
	1273	8.834	$-2.149 \cdot 10^5$
	1373	8.279	$-2.173 \cdot 10^5$
V_2O_3	1173	-2.4	$5.381 \cdot 10^4$
	1273	-2.316	$5.197 \cdot 10^4$
	1373	-1.91	$5.013 \cdot 10^4$
TiO_2	1173	-9.9	$2.22 \cdot 10^5$
	1273	-9.308	$2.265 \cdot 10^5$
	1373	-8.803	$2.31 \cdot 10^5$

Анализируя данные в табл. 1 и 2 можно сделать вывод, что при использовании оксидов ванадия и титана окисления марганца и кремния не происходит. Поэтому для упрочнения целесообразно использовать оксиды железа, хрома и молибдена. В результате расчетов равновесных концентраций элемен-

тов основы чугуна после окисления было установлено, что химический состав слоя соответствует стали.

В табл. 3 приведен химический состав образцов после диффузионного легирования.

Таблица 3

Химический состав слоя

Оксид FeO			
Время выдержки τ , ч	C, %	Mn, %	Si, %
4	0.74	0.48	1.67
8	0.18	0.34	1.29
Оксид Cr_2O_3			
4	0.87	0.58	1.8
8	0.15	0.49	1.4
Оксид MoO_2			
4	0.96	0.66	1.92
8	0.24	0.53	1.54

Из табл. 3 видно, что химический состав слоя соответствует стали. На рис. 3 и 4 приведена микроструктура слоя при взаимодействии с оксидом хрома и титана.

В результате металлографических исследований было установлено, что после взаимодействия с оксидами железа, хрома и молибдена получается перлитная структура слоя с шаровидными включениями графита

(рис. 3). При использовании оксида титана и ванадия включения графита остаются пластинчатыми. Толщина упрочненного слоя достигает 3 мм (при использовании оксида молибдена). Твердость после закалки составляет 58...65 HRC, что сопоставимо с высокопрочным закаленным чугуном.

При этом на поверхности имеется слой чистого феррита, который обладает понижен-

ной твердостью. На рис. 5 приведено схематичное изображение диффузионного слоя.



Рис. 3. Микроструктура слоя после окисления Cr_2O_3 x400

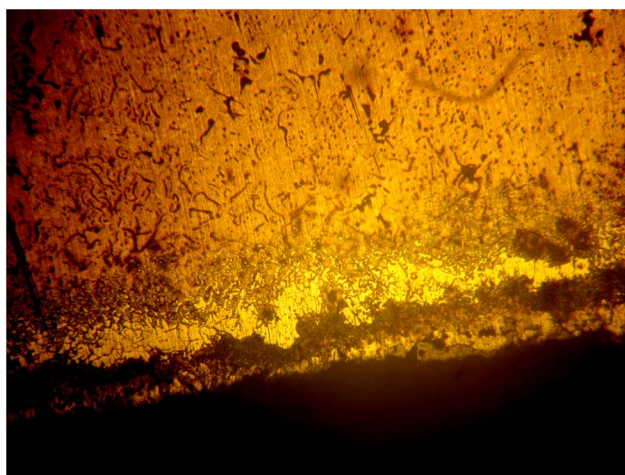


Рис. 4. Микроструктура слоя после окисления TiO_2 x400

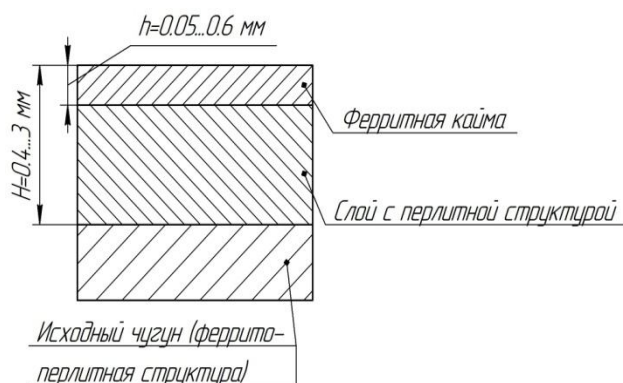


Рис. 5. Схематичное изображение диффузионного слоя

4. Обсуждение результатов

Разработанная технология позволяет получать на поверхности деталей из серого чугуна упрочненный слой, толщина которого в 5...10 раз больше, чем при традиционных методах упрочнения. В плане применимости в ремонтном производстве преимуществом является то, что в качестве оборудования может использоваться любая печь, а в качестве материалов - оксиды легирующих элементов, что существенно удешевляет процесс.

Проведем оценку технического уровня по сравнению с лазерной закалкой и традиционной технологией диффузионного хромирования чугуна в газовой среде.

Оценка технического уровня производится по шести показателям:

- производительность процесса;
- толщина упрочненного слоя;
- потребляемая мощность;
- относительная износостойкость покрытия;
- площадь, занимаемая установкой;
- стоимость установки.

В качестве исходных данных для расчета рассмотрим упрочнение отверстия корпуса гидрораспределителя (материал детали СЧ-15), размеры которого соответственно равны:

- диаметр отверстия 300 мм;
- длина отверстия 400 мм.

В качестве оборудования примем волоконный лазер модели YLR3000, установку для химической металлизации на базе печи SG-QF1400 и печь SNOL 10/14.

Результаты оценки технического уровня приведены в табл. 4.

Коэффициент технического уровня по совокупности показателей для аналога YLR3000:

$$K_{\text{ТУ}1} = \frac{1.3+5.4+2+1+1+25}{6} = 5.95 .$$

Коэффициент технического уровня по совокупности показателей для аналога SG-QF1400:

$$K_{\text{ТУ}2} = \frac{1+1.8+1.6+1+1.6+6.5}{6} = 2.3 .$$

Таким образом, по совокупности показателей разработанная технология превосходит аналога.

Таблица 4

Оценка технического уровня метода термодиффузионного поверхностного легирования

Наименование показателя	Значение показателей			q_i	
	YLR 3000	Традиционная технология диффузионного хромирования	Разработанная технология		
Производительность установки, шт/смену	3	4	4	1,3	1,0
Толщина упрочненного слоя, мм	0,2	0,6	1,08	5,4	1,8
Потребляемая мощность, кВт	20	16	10	2,0	1,6
Относительная износостойкость упрочненного слоя	4	4	4	1,0	1,0
Занимаемая площадь, м ²	5	4	3	1,0	1,6
Стоимость установки, тыс. руб.	2500	650	100	25	6,5

Основной аспект, который оказывает влияние на проектирование операций, является наличие в упрочненном слое ферритной каймы, которая обладает низкой твердостью и износостойкостью. С одной стороны, это обеспечивает благоприятный характер процесса приработки пары трения, так как слой с низкой твердостью достаточно быстро изнашивается и при этом образуется оптимальная микрогеометрия поверхностей контакта. Однако при жестких требованиях к величине допускаемого износа ферритную кайму необходимо удалять в обязательном порядке.

В качестве дополнительного критерия, который определяет необходимость последующей механической обработки слоя, можно ввести следующее соотношение:

$$[h] < k \cdot [h_{дс}], \quad (11)$$

где $[h]$ – допустимый износ слоя; $[h_{дс}]$ – толщина дефектного слоя; k – коэффициент запаса.

Если неравенство (11) справедливо, то ферритную кайму необходимо удалять.

Последовательность проектирования операций термодиффузионного поверхностного легирования имеет вид:

1. Задается величина требуемого ресурса работы и допустимого износа.
2. Проверяется условие (11).
3. Определяется толщина упрочненного слоя $[h_{yc}]$.

4. Определяются параметры шероховатости поверхности упрочненного слоя (в случае, если условие 11 выполняется).

5. Определение времени изнашивания $t_{изн}$.

6. Определение ресурса работы L_h .

7. Проверка условия $L_h \gg [L_h]$.

8. При невыполнении условия в п. 6 корректировка величины $[h_{yc}]$.

9. В зависимости от условий работы узла выбирается легирующий элемент.

10. Назначаются режимы закалки.

Графически алгоритм проектирования операций представлен на рис. 6.

Использование рассматриваемой технологии позволяет совершенствовать также метод ремонтных размеров. Во-первых, значительная толщина упрочненного слоя дает возможность избежать повторного упрочнения после обработки в ремонтный размер. Во-вторых, в ходе исследований было выявлено, что твердость по толщине упрочненного слоя возрастает, что также дает преимущество. Таким образом, применение разработанной технологии термодиффузионного поверхностного легирования позволяет решить задачу повышения долговечности строительного-дорожных машин в условиях ремонтного производства.

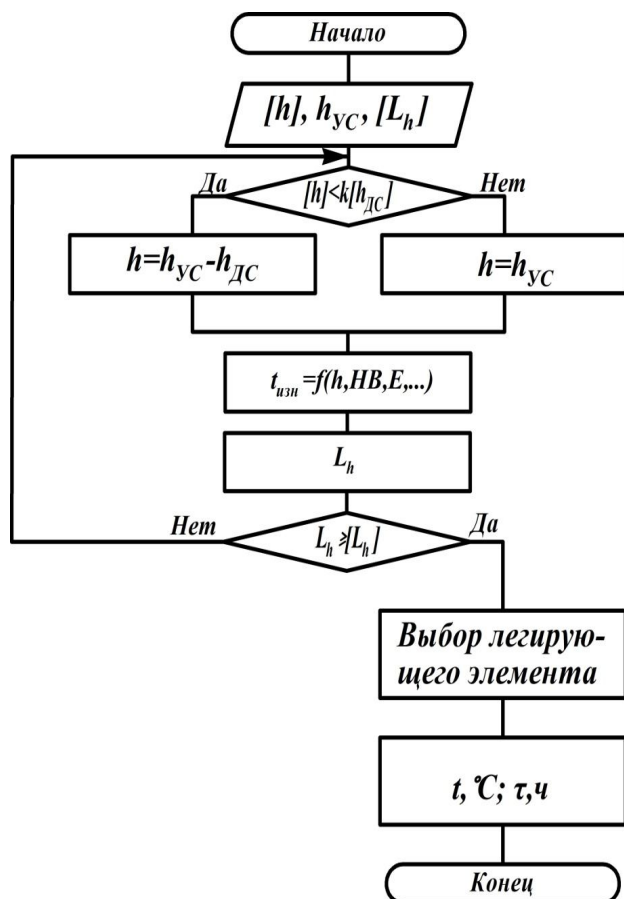


Рис. 6. Алгоритм проектирования операций термодиффузионного поверхностного легирования

Список литературы

1. Кокорин, Н.А. Краткий справочник материалов, воспринимающих криогенное воздействие / Н.А. Кокорин. – Ижевск: ООО «НПЦ «КриоТехРесурс», 2015. – 38 с.
2. Криштал, М.А. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера / М.А. Криштал, Л.А. Жуков, А.Н. Кокора. – М.: Metallurgiya, 1973. – 191 с.
3. Пат. 2176578 Рос. Федерация: МПК7: C21D5/00. Способ упрочнения чугуновых деталей / Поляченко А.В., Евсеенко В.В.; заявитель и патентообладатель Поляченко А.В., Евсеенко В.В. – № 2000112079/02; заявл. 17.05.2000; опубл. 10.12.2001. Бюл. № 34.
4. Веселовский, А.А. Термодиффузионное упрочнение деталей гидроцилиндров из серого чугуна алюминием и ванадием в порошковой среде: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / А.А. Веселовский; [Место защиты: Магн. гос. техн. ун-т]. - Магнитогорск,

5. Заключение

Полученные результаты дают возможность сделать ряд выводов:

- использование термодиффузионного легирования нагревом в контакте с оксидами легирующих элементов позволяет получать на поверхности чугуна слой толщиной до 3 мм и повышать микротвердость в 2...3 раза по сравнению с исходным чугуном;
- разработанный способ целесообразно использовать в ремонтном производстве, так как не требуется специального оборудования и дорогостоящих расходных материалов;
- по результатам оценки технического уровня, установлено, что разработанный способ при упрочнении серого чугуна более эффективен, чем аналоги.

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований можно выделить:

- разработку технологических маршрутов ремонта деталей и узлов строительно-дорожных машин с применением термодиффузионного поверхностного легирования;
- исследование процессов механической обработки деталей с упрочненным слоем.

References

1. Kokorin N.A. *Kratkiy spravochnik materialov, vosprinimayushchikh kriogennoye vozdeystvie* [Quick Reference for Cryogenic Perception Materials]. Izhevsk, NPTs «Kri-oTehResurs, 2015. 38 p. (In Russian).
2. Kryshtal M.A., Zhukov L.A., Kokora A.N. *Struktura i svoystva splavov, obrabotannykh izlucheniem lazera* [Structure and properties of alloys treated with laser radiation]. Moscow, Metallurgiya, 1973. 191 p. (In Russian).
3. Patent RU 2176578, C21D5/00. *Sposob uprochneniya chugunnykh detaley* [The method of hardening cast iron parts]. Polyachenko A.V., Yevseyenko V.V. Published 10.12.2001. (In Russian).
4. Veselovskiy A.A. Thermal diffusion hardening of parts of gray iron cast cylinders with aluminum and vanadium in a powder medium. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Magni-

2008. - 147 с.

5. Саати, Т.Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т.Л. Саати. – Москва: Радио и связь, 1993. – 278 с.

6. Гуревич, Ю.Г. Влияние катализатора (железа) на взаимодействие оксидов с основной феррито-перлитного серого чугуна, обеспечивающее закалку и диффузионное легирование / Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов. - Курган: Изд-во КГУ, 2013. - 102 с.

7. Гуревич, Ю.Г. Легирование железа через газовую хлоридную фазу / Ю.Г. Гуревич, В.Я. Буланов, Н.В. Германюк. – Свердловск: Академия наук СССР. Уральское отделение, 1992. - 190 с.

† togorok. 2008. 147 p. (In Russian).

† 5. Saati T.L. *Prinyatie resheniy. Metod analiza ierarkhiy* [Making decisions. Hierarchy analysis method]. Moscow, Radio i svyaz, 1993. 278 p. (In Russian).

† 6. Gurevich Yu.G., Ovsyannikov V.Ye., Frolov V.A. *Vliyanie katalizatora (zheleza) na vzaimodeystvie oksidov s osnovoy ferrito-perlitnogo serogo chuguna, obespechivayushchee zakalku i diffuzionnoe legirovanie* [The influence of the catalyst (iron) on the interaction of oxides with the base of ferritic-pearlitic gray iron, which ensures quenching and diffusion doping]. Kurgan, KGU, 2013. 102 p. (In Russian).

† 7. Gurevich Yu.G., Bulanov V.Ya., Germanyuk N.V. *Legirovanie zheleza cherez gazovuyu khlordnuyu fazu* [Iron doping through the gas chloride phase]. Sverdlovsk, Akademiya nauk SSSR. Uralskoe otdelenie, 1992. 190 p. (In Russian).