

Особенности моделирования технологического процесса упрочнения деталей лесохозяйственных машин методом газотермического напыления

В.И. Кретинин^{1а}, А.В. Теппов^{1б}, В.А. Соколова^{2с}

¹Санкт-Петербургский лесотехнический университет им. С.М. Кирова, пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

²Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного, Тихорецкий пр., 3, Санкт-Петербург, Россия

^а kvi_1960@mail.ru, ^б avt01@inbox.ru, ^с sokolova_vika@inbox.ru

^а <https://orcid.org/0000-0003-0467-4080>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-8589-444X>,

^с <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

Статья поступила 21.01.2022, принята 28.01.2022

Эффективность работы рабочих органов почвообрабатывающих лесохозяйственных машин определяется остротой их почворежущих элементов. Цель исследования — обоснование режимов технологического процесса упрочнения и восстановления режущих рабочих лесохозяйственных машин методом газопламенного напыления износостойких покрытий для повышения их износостойкости и сохранения остроты лезвия путем реализации эффекта самозатачивания, который позволяет увеличить их ресурс в 2–3 раза. Технико-экономические показатели процесса газопламенного напыления, а также область его применения зависят от того, насколько правильно выбраны технологические режимы процесса напыления. Актуальность темы обусловлена необходимостью повышения долговечности почвообрабатывающих органов путем упрочняющих обработок их поверхностей. К числу таких эффективных методов может быть отнесена технология восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин с использованием технологии газопламенного напыления. В этой связи особую актуальность приобрели вопросы проведения исследований по выявлению связей технологических параметров при газопламенном нанесении износостойких покрытий, изменению прочностных характеристик материала деталей при их восстановлении, обеспечивающих необходимую надежность и долговечность.

Ключевые слова: моделирование; технологический процесс; газотермическое напыление.

Peculiarities of modeling the technological process of hardening the details of forestry machines by gas-thermal spraying method

V.I. Kretinin^{1а}, A.V. Tepпов^{1б}, V.A. Sokolova^{2с}

¹St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

²Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M. Budyonny, Tikhoretsky pr., 3, St. Petersburg, Russia

^а kvi_1960@mail.ru, ^б avt01@inbox.ru, ^с sokolova_vika@inbox.ru

^а <https://orcid.org/0000-0003-0467-4080>, ^б <https://orcid.org/0000-0002-8589-444X>,

^с <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>

Received 21.01.2022, accepted 28.01.2022

The efficiency of the working bodies of tillage machines is determined by the severity of their soil cutting elements. The purpose of the study is to substantiate the conditions of the technological process of hardening and restoration of cutting working forestry machines by the method of gas-flame spraying of wear-resistant coatings in order to increase their wear resistance and maintain blade sharpness by implementing the self-sharpening effect, which allows to increase their life by 2-3 times. The technical and economic parameters of the flammable sputtering process, as well as the scope of its application, depend on how correctly the process modes of the sputtering process are chosen. The relevance of the topic is due to the need to increase the durability of tillage organs by strengthening their surfaces. Such efficient methods include the technology of restoring and strengthening the working bodies of tillage machines using the technology of flame spraying. In this regard, research surveys have acquired particular relevance: on the identification of technological parameters for gas-flame application of wear-resistant coatings; changing the strength characteristics of the material of the parts during their restoration, ensuring the necessary reliability and durability.

Keywords: modeling; technological process; gas-thermal spraying.

Введение. Важнейшими технологическими операциями при воспроизводстве лесных ресурсов являются подготовка почвы и посадка лесных культур. Применяемые для этих целей почвообрабатывающие машины и орудия в ряде случаев не обеспечивают надлежащего качества выполняемых работ из-за быстрого затупления режущих элементов (лемехов, лап, дисков, ножей и др.). Работоспособность почвообрабатывающих машин определяется доремонтным ресурсом их рабочих органов. Наблюдения показывают, что почворежущие детали либо эксплуатируются при неудовлетворительных показателях работ, либо многократно подвергаются ремонту и частой замене [2]. Это связано с дополнительными затратами труда и простоями машинотракторных агрегатов. Снижение эксплуатационных расходов может быть достигнуто, прежде всего, путем увеличения ресурса быстроизнашивающихся деталей. Таким образом, повышение износостойкости почворежущих элементов позволит в известной мере решить задачу повышения долговечности рабочих органов лесохозяйственных машин.

Одним из наиболее эффективных путей повышения долговечности режущих рабочих органов лесохозяйственных машин, взаимодействующих с почвой и древесно-кустарниковой растительностью, является использование их биметаллической рабочей части, позволяющей реализовать эффект самозатачивания. По сравнению со стандартными, ресурс таких деталей увеличивается в 2–3 раза [3]. В настоящее время накоплен большой опыт повышения износостойкости деталей поверхностным упрочнением.

Успехи в развитии материаловедения, физики, химии и машиностроения позволили внедрить в ремонтную практику ряд технологических процессов, которые дают возможность решать проблему повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин. В особенности широкое применение получили способы наплавки износостойкого слоя. Однако применительно к конкретным почворежущим деталям лесохозяйственных машин эти способы или малоэффективны или технологически затруднительны. Следует отметить, что далеко не всегда еще применяются способы и технология упрочнения при восстановлении деталей, которые обеспечивают рациональную экономическую эффективность и долговечность деталей в конкретных условиях эксплуатации. В настоящее время все более определяется мнение, подтвержденное теорией и практикой, что восстановление деталей должно оцениваться надежностью технологического процесса, стабильностью физико-механических свойств покрытий. В связи с этим возникает необходимость разработки и применения частных технологических мер повышения износостойкости.

Одним из прогрессивных и высокоэффективных методов повышения долговечности деталей лесохозяйственных машин является метод газотермического нанесения (ГТН) порошковых материалов, позволяющий реализовать в одном технологическом процессе одновременно восстановление геометрических размеров и упрочнение поверхности. Среди способов ГТН практический интерес для предприятий отрасли представляют плазменно-

дуговой и газопламенный (без оплавления и с оплавлением). Газотермическое напыление покрытий заключается в нагреве распыляемого материала газотермической струей до жидкотекучего или вязкотекучего состояния (диспергированного (порошкообразного) материала), образования двухфазового газопорошкового потока, переноса этим потоком напыляемого материала и формировании покрытия на поверхности детали. Эти способы имеют ряд преимуществ: ограниченное тепловое воздействие на обрабатываемую деталь и уменьшение деформаций, минимальная глубина проплавления (менее 0,1 мм), обеспечение незначительного перемешивания основного металла с материалом покрытия и возможность получения физико-механических свойств покрытий, соответствующих свойствам наплавочного порошкового материала, и нанесения на поверхность порошков различных составов и заданной толщины.

Однако все способы газотермического напыления покрытий имеют существенный недостаток — сравнительно низкую прочность сцепления с основным материалом, а также зависимость ее от режимов напыления.

Цель исследования — определение режимов технологического процесса упрочнения почворежущих деталей рабочих органов лесохозяйственных машин методом газопламенного напыления износостойких покрытий, позволяющих обеспечить максимальную прочность сцепления покрытия с основным материалом поверхности.

Объекты и методы исследования. При проектировании технологического процесса восстановления деталей необходимо создание его математической модели, отбор наиболее важных факторов и показателей. Эту проблему можно решить методом последовательных приближений, включая в модель все измеряемые факторы, а затем исключая наименее существенные, либо с использованием экспертных оценок. Однако при применении экспертных оценок недостаточно обосновывается удельный вес мнений экспертов, что в итоге ведет к построению модели, показатели которой в большей степени определяются субъективизмом исследователей. В данной статье предлагается алгоритм моделирования (рис. 1), в котором необходимо изучить технологический процесс для выявления основных его показателей и перечня измеряемых факторов, влияющих на этот показатель (блок 1). Если процесс характеризуется несколькими показателями, каждый из которых отражает лишь одну сторону, то необходимо подобрать результирующий показатель или иметь несколько моделей по каждому из показателей с влияющими на него факторами. Когда процесс достаточно сложен, необходимо использовать метод экспертных оценок. Для этого требуется создание экспертной группы и уточнение необходимого перечня показателей и факторов анализируемого процесса (блок 2).

Проведение экспертной оценки осуществляется двумя путями:

- 1) определяется перечень показателей и факторов по результатам опубликованных работ; проводится опрос экспертов в два этапа, по результатам которого устанавливаются основной показатель и совокупность ранжированных факторов, которые существенно влияют на этот показатель.



Рис. 1. Алгоритм многофакторного моделирования технологических процессов

Ранговая корреляция (блок 3) позволяет исключить из дальнейшего исследования факторы, которые не оказывают существенного воздействия на основной показатель анализируемого технологического процесса. Сбор и систематизация экспериментальных данных (блок 4) — наиболее ответственный этап, так как от достоверности исходной информации зависит качество полученных моделей. Блок 5 алгоритма можно реализовать с использованием пакета прикладных программ по математической статистике.

Важным является вопрос выбора формы связи между результативным признаком Y и влияющими на него факторами X_i . Этот вопрос решается на основе глубокого анализа физической природы исследуемого технологического процесса. При отсутствии указанных условий моделирование проводится с использованием линейной формы связи вида:

$$Y = \sum_{i=0}^n b_i * X_i \quad (1)$$

где b_i — коэффициент множественной регрессии фактора.

Моделирование технологического процесса завершается анализом результатов эксперимента, оценкой качества уравнений и адекватности модели исследуемому процессу (блок 6). При анализе результатов исследований устанавливается сила влияния отдельных факторов на результирующий признак и выполняется ранжирование факторов по коэффициенту ранговой корреляции r_i . Если между двумя или более факторами обнаруживается слишком тесная корреляционная связь

($r_i \geq 0,85$), что говорит об их дублировании, необходимо один из них изъять, а параметры модели пересчитать заново.

Оценку качества полученных уравнений можно проводить по коэффициенту множественной детерминации и определением статистической значимости каждого из факторов и коэффициента множественной корреляции по t -критерию Стьюдента.

Проверка адекватности модели заключается в сопоставлении экспериментальных данных по каждому из факторов с теоретическими данными по выражению:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \lambda_i (x_i^3 - x_i^M)^2 \quad (2)$$

где x_i^3 — экспериментальные значения i -го фактора; x_i^M — значение переменной величины в модели по i -му фактору; λ_i — коэффициент весомости.

Модель с хорошими показателями качества обеспечивает не только обоснованное описание технологического процесса, но и дает возможность совершенствовать порядок его проведения, оптимизируя в дальнейшем по какому-либо критерию. При отсутствии указанных свойств модель должна быть перестроена с учетом накопленного опыта (обратная связь с блока 6 на блок 1).

Изложенный алгоритм был использован при моделировании многофакторного технологического процесса упрочнения почворежущих деталей рабочих органов лесохозяйственных машин методом газопламенного напыления износостойких покрытий.

Основным фактором, от которого зависит качество газопламенного покрытия, является точность математической модели процесса напыления, обеспечивающая стратегию и алгоритмы управления свойствами покрытий.

Для разработки принципов управления качеством газопламенных покрытий необходимо рассмотреть факторы и их влияние на качество напыляемых покрытий. При газопламенном напылении покрытия все факторы, влияющие на его качество, можно разделить на две группы. К первой группе относятся факторы, определяющие параметры процесса газопламенного напыления: состав и расход горючей газовой смеси, свойства напыляемого материала, конструкция газопламенной горелки, скорость и температура струи горючей газовой смеси, а также напыляемых частиц. Ко второй группе относятся твердость и шероховатость напыляемой поверхности, дистанция напыления, температура основы, скорость перемещения напыляемой поверхно-

сти по отношению к горелке, условия охлаждения напыляемого покрытия, дополнительные воздействия на напыляемую деталь и покрытие. Обобщенная схема влияния факторов на показатели качества газопламенных покрытий и их связь с технологическими операциями напыления представлена на рис. 2.

Из обобщенной схемы (рис. 2) видно, что от первой группы факторов зависят температура и скорость напыляемых частиц, которые достигают основы и определяют свойства покрытий. Постоянные величины температуры и скорости частиц достигаются стабильностью состава и расхода горючей газовой смеси, однородным фракционным составом напыляемого материала. Вторая группа факторов также влияет на все показатели качества покрытия. Поэтому повышение качества напыляемого покрытия может быть достигнуто с учетом комплексного влияния факторов первой и второй группы.

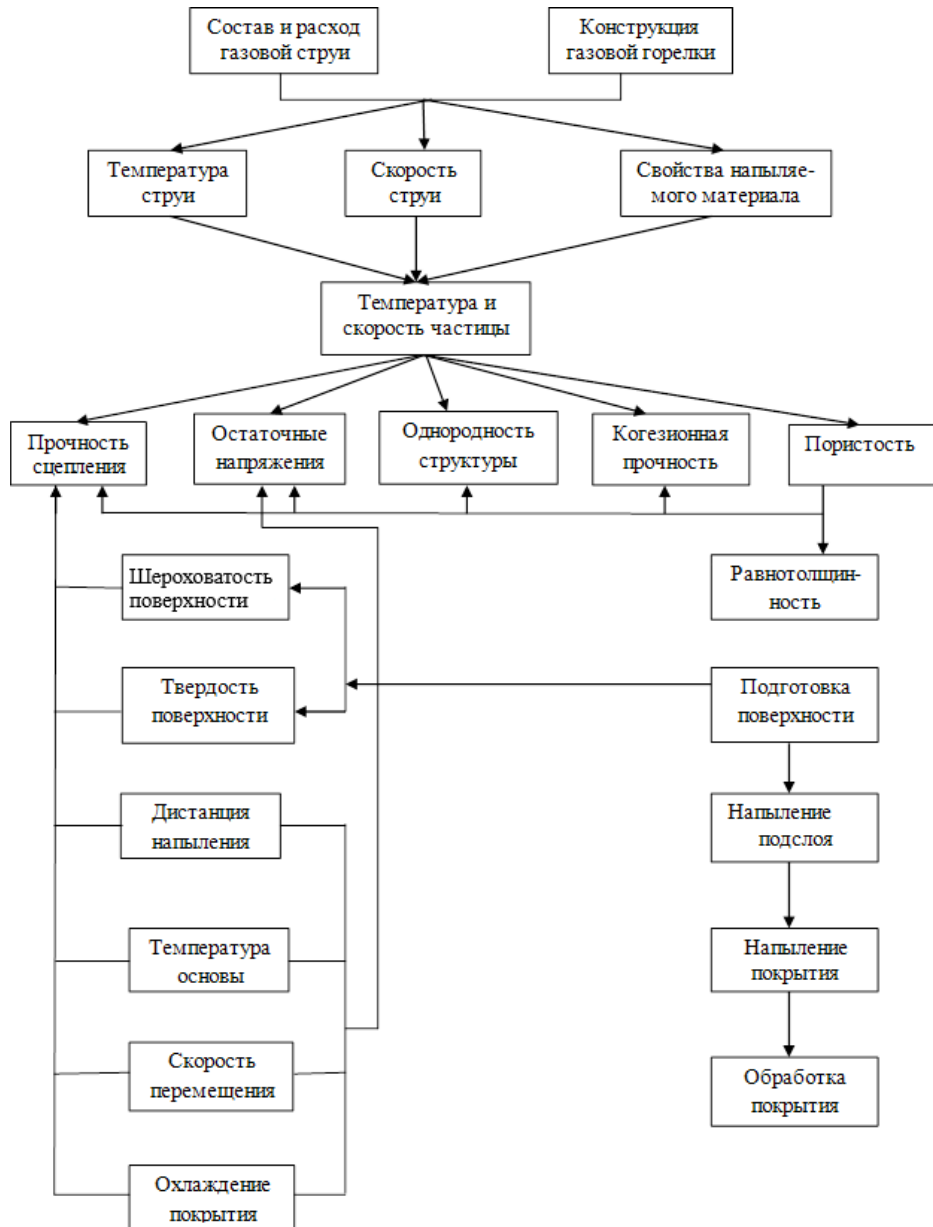


Рис. 2. Обобщенная схема влияния факторов на показатели качества газопламенных покрытий

Технико-экономические показатели процесса газопламенного напыления, а также область его применения зависят от того, насколько правильно выбраны технологические режимы процесса напыления. Для того, чтобы определить наиболее рациональные режимы нанесения износостойкого покрытия, необходимо знать основные зависимости показателей газопламенного напыления от технологических факторов, к которым, в результате анализа научно-технической литературы [1; 2], следует отнести такие, как дистанция нанесения покрытия, вид и расход горючей смеси, скорость перемещения пистолета. Указанные факторы связаны между собой и могут оказывать комплексное влияние на эксплуатационные свойства покрытий, основным из которых является прочность сцепления покрытия с основным материалом, что крайне важно для почворежущих деталей, работающих в условиях ударных нагрузок.

В ряде работ [3; 4] целесообразным предлагается считать режим, обеспечивающий максимальную прочность сцепления. Однако при этом необходимо учитывать и другой, не менее важный показатель, влияющий на технико-экономическую эффективность газопламенного напыления — коэффициент использования порошка. Поскольку определение искомых зависимостей основных показателей газопламенного напыления от его технологических факторов обусловлено комплексным влиянием переменных факторов на процесс напыления, то выявление этих зависимостей рекомендуется производить экспериментально.

Прочность сцепления покрытия с основным материалом является функцией многих технологических факторов. На основании анализа научно-технической информации [5] и опыта применения ГПН в других отраслях промышленности для исследования выбраны следующие главные переменные технологические фак-

торы, оказывающие наибольшее влияние на прочность сцепления: L — дистанция напыления; Q_a — мощность пламени, обусловленная расходом ацетилена; h — толщина покрытия. Данные технологические факторы позволяют непосредственно управлять процессом напыления и являются определяющими для применения любого оборудования для ГПН. При напылении скорость перемещения аппарата фиксировалась на уровне согласно расчетным данным. Остальные факторы были зафиксированы на следующих уровнях: дисперсность порошка $d_n = 40...100$ мкм; расход порошка $\Pi_n = 2,3$ кг/ч, коэффициент горючей смеси $\beta = 1,2$; температура предварительного подогрева основы $T_o = 150...200$ °С; время между струйно-абразивной обработкой $t = 0,5$ ч.

На основании анализа литературных источников [4; 5] установлено, что зависимость прочности сцепления покрытия с основой от технологических факторов носит нелинейный характер с явно выраженным экстремумом. Вследствие чего определение вида искомой зависимости проводили по результатам полного факторного эксперимента 2-го порядка по композиционному плану.

Результаты исследования и их обсуждение. Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл. 1. Значения уровней и интервалов варьирования факторов отражены в табл. 2.

Статистическая обработка результатов экспериментов была проведена по известным методикам. Оценка экспериментальных данных на воспроизводимость по критерию Кохрена показала, что выборка значений прочности сцепления однородна, так как полученная расчетная величина $G_{расч.} = 0,184$ меньше $G_{табл.} = 0,33$ при уровне значимости $q = 0,5$.

Таблица 1

№ опыта	X_1	X_2	X_3	$Y_1,$ МПа	$Y_2,$ МПа	$Y_3,$ МПа	$Y_{ср},$ МПа
1	–	–	–	31,15	31,0	31,15	31,1
2	+	–	–	27,4	27,8	27,9	27,7
3	–	+	–	39,8	41,0	39,23	40,01
4	+	+	–	38,1	38,5	38,5	38,4
5	–	–	+	27	27,8	28	27,6
6	+	–	+	25,9	25,8	26,6	26,1
7	–	+	+	36,0	38,1	35,5	35,2
8	+	+	+	35	34,5	33,7	34,4
9	–1,215	0	0	34,5	35,7	35,1	35,1
10	+1,215	0	0	32,9	34,5	33,4	33,6
11		–1,215	0	31,5	31,0	32,6	31,76
12	0	+1,215	0	41,3	41,1	41,5	41,3
13	0	0	–1,215	33,8	34,3	33,9	34,0
14	0	0	+1,215	30,2	29,2	29,1	29,5
15	0	0	0	37,2	38,2	38,0	37,8

Таблица 2

Фактор	Код	$-\alpha$	-	0	+	$+\alpha$	$\Delta\bar{X}_l$
1. Дистанция напыления L , мм	X_1	133,55	140	170	200	206,5	30
2. Расход ацетилена Q_a , м ³ /ч	X_2	0,46	0,5	0,7	0,9	0,94	0,2
3. Толщина покрытия h_a , мм	X_3	0,4	0,5	1,0	1,5	1,6	0,5

После расчета и оценки значимости коэффициентов уравнения регрессии по t-критерию Стьюдента и исключения незначимых коэффициентов была получена регрессионная зависимость прочности сцепления покрытия с основой от технологических режимов напыления:

$$y = 36,94 - 0,922X_1 + 4,399X_2 - 1,678X_3 - 1,44X_1^2 - 3,21X_3^2 \quad (3)$$

Для оценки точности значения выходной величины, полученной по регрессионной модели проведена проверка адекватности зависимости (1) результатам эксперимента по F -критерию Фишера. Так как расчетное значение критерия ($F_{\text{расч}} = 2,91$) получилось меньше табличного ($F_{\text{табл}} = 3,07$), то можно сделать вывод об адекватности полученной модели результатам эксперимента.

Анализ зависимости (1) показывает, что увеличение мощности пламени (фактор X_2) ведет к росту прочности сцепления во всем исследуемом диапазоне. Рост расхода ацетилена положительно влияет на качество сцепления покрытия, что объясняется увеличением напорного давления удара частиц о поверхность основы, в свою очередь, являющегося движущей силой физико-химического взаимодействия покрытия с основой. Поэтому целесообразно увеличивать расход ацетилена в пределах рабочего диапазона. Изменение дистанции напыления (фактор X_1) до определенных пределов ведет к увеличению прочности сцепления покрытия с основой. При переходе этой границы прочность сцепления заметно снижается. Достижение наибольшей прочности сцепления покрытия с основой в этом случае объясняется рациональным сочетанием скорости полета частиц порошка и их температурой. Анализ влияния изменения толщины покрытия на прочность сцепления с основой позволил сделать вывод о том, что

прочность сцепления имеет явно выраженный экстремум при определенном значении толщины покрытия. С ростом толщины покрытия (фактор X_3) до некоторой величины наблюдается увеличение усилия, необходимого для отрыва покрытия от матрицы. Дальнейшее нарастание толщины покрытия сопровождается уменьшением прочности сцепления. Это объясняется тем, что при тонких покрытиях недостаточна его жесткость, и имеют место деформация напыленного слоя над штифтом, его прогиб и растрескивание, что приводит к понижению усилия, необходимого для разрушения. Вследствие роста толщины покрытия происходит подавление этих явлений, что сопровождается увеличением фиксируемой при испытаниях прочности. В то же время, увеличение толщины покрытия сопровождается нарастанием внутренних напряжений в системе «покрытие — основа», результатом чего является снижение прочности сцепления и возможность адгезионного разрушения.

После перевода нормализованных значений факторов в натуральные по известным формулам зависимость (3) принимает следующий вид:

$$\sigma_{\text{сц}} = -29 + 0,514L + 21,99Q_a + 15,91h_a - 0,0016L^2 - 6,42h_a^2 \quad (4)$$

Зависимость (2) имеет максимум $\sigma_{\text{сц}} = 33,69$ МПа при $L = 162 \dots 166$ мм, $Q_a = 0,78 \dots 0,8$ м³/ч, $h_a = 1,2 \dots 1,4$ мм.

Выводы

Данные значения технологических режимов ГПН позволяют достичь максимальной прочности сцепления покрытия с основой. Полученная модель процесса восстановления и упрочнения деталей лесохозяйственных машин предлагаемым способом может быть положена в основу при дополнительных исследованиях и обеспечить оптимальное его проведение.

Литература

1. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 356 с.
2. Хромов В.Н., Зайцев С.А. Технология упрочнения лап культиватора газопламенным напылением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2009. № 4/276 (575). С. 37-42.
3. Коломейченко А.В., Зайцев С.А. Влияние дистанции напыления на физико-механические свойства при упрочнении газопламенным напылением рабочих поверхностей лап культиваторов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 5. С. 32-34.
4. Балдаев Л.Х. Газотермическое напыление порошковых материалов для получения защитных покрытий с заданными свойствами: дис. ... д-ра техн. наук. Курск, 2009. 317 с.
5. Кретинин В.И., Соколова В.А., Теппоев А.В., Марков В.А. Особенности формирования равномерных по толщине газотермических покрытий на плоских поверхностях // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 3 (47). С. 101-105.
6. Балдаев Л.Х. Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления: моногр. М.: КХТ, 2004. 134 с.
7. Шестаков А.И., Беленов А.С. Восстановление и защита деталей и конструкций от износа и коррозии методом плазменного сверхзвукового газотермического напыления покрытий. М.: Ин-т повышения квалификации гос. служащих, 2011. 63 с.

8. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин. Иваново: Ивановский гос. хим.-технологический ун-т, 2009. 64 с.
9. Соколов И.О., Газбан З.Э., Пискунова О.Ю. Упрочнение деталей деревообрабатывающего оборудования газотермическим напылением // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая пром-сть. 2013. № 2 (158). С. 219-222.
10. Тимохова О.М., Бурмистрова О.Н., Тимохов Р.С. Исследование интенсивности изнашивания газотермических покрытий деталей лесных машин // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. № 8 (98). С. 153-157.
11. David E.J., James D.R. Corrosion science and technology. CRC Press, 2010. 432 p.
12. Kretinin V.I., Sokolova V.A., Voinash S.A. The Qualitative Assessment of Gas-Thermal Coating's Cohesive Strength Estimation Methods // Solid State Phenomena. V. 299. P. 949-954.
13. Радюк А.Г. Процессы нанесения и обработки газотермических покрытий и технологии изготовления деталей металлургического оборудования и металлопродукции: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2003. 338 с.
14. Dolmatov A.V., Gulyaev I.P., Kuzmin V.I., Lyskov E.A., Ermakov K.A. Analysis and optimization of gas-thermal spray process in terms of condensed phase velocity and temperature // Thermophysics and Aeromechanics volume. 2017. № 24. P. 83-94.
15. Беляков Н.В., Горохов В.А. Современные тенденции развития оборудования и инструмента для изготовления деталей машин. Витебск: Витебский гос. технологический ун-т, 2021. 639 с.
4. Baldaev L.H. Gasthermal spraying of powder materials for obtaining protective coatings with specified properties: dis. ... d-ra tekhn. nauk. Kursk, 2009. 317 p.
5. Kretinin V.I., Sokolova V.A., Teppoev A.V., Markov V.A. Features of formation of gas-thermal coatings uniform in thickness on flat surfaces // Systems. Methods. Technologies. 2020. № 3 (47). P. 101-105.
6. Baldaev L.H. Renovation and hardening of machine parts by gas-thermal spraying methods: monogr. M.: KKHT, 2004. 134 p.
7. SHestakov A.I., Belenov A.S. Restoration and protection of parts and structures against wear and corrosion by plasma supersonic gas-thermal coating spraying. M.: In-t povysheniya kvalifikacii gos. sluzhashchih, 2011. 63 p.
8. Stepanova T.YU. Technologies of surface hardening of machine parts. Ivanovo: Ivanovskij gos. him-tekhnologicheskij un-t, 2009. 64 p.
9. Sokorov I.O., Gazban Z.E., Piskunova O.YU. Hardening of woodworking equipment parts by gas-thermal spraying // Proceedings of BSTU. № 2. Forest and Woodworking Industry. 2013. № 2 (158). P. 219-222.
10. Timohova O.M., Burmistrova O.N., Timohov R.S. Study of wear intensity of gas-thermal coatings of forest machine parts // International Research Journal. 2020. № 8 (98). P. 153-157.
11. David E.J., James D.R. Corrosion science and technology. CRC Press, 2010. 432 p.
12. Kretinin V.I., Sokolova V.A., Voinash S.A. The Qualitative Assessment of Gas-Thermal Coating's Cohesive Strength Estimation Methods // Solid State Phenomena. V. 299. P. 949-954.
13. Radyuk A.G. Processes of application and treatment of gas-thermal coatings and technologies of manufacturing of parts of metallurgical equipment and metal products: dis. ... d-ra tekhn. nauk. M., 2003. 338 p.
14. Dolmatov A.V., Gulyaev I.P., Kuzmin V.I., Lyskov E.A., Ermakov K.A. Analysis and optimization of gas-thermal spray process in terms of condensed phase velocity and temperature // Thermophysics and Aeromechanics volume. 2017. № 24. P. 83-94.
15. Belyakov N.V., Gorohov V.A. Modern trends in the development of equipment and tools for the manufacture of machine parts. Vitebsk: Vitebskij gos. tekhnologicheskij un-t, 2021. 639 p.

References

1. Puzryakov A.F. Theoretical foundations of plasma sputtering technology: training on the course "Technology of structures from metal composites". M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauma-na, 2003. 356 p.
2. Hromov V.N., Zajcev S.A. Technology for hardening the cultivator's legs with gas-flame sputtering // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. 2009. № 4/276 (575). P. 37-42.
3. Kolomejchenko A.V., Zajcev S.A. Influence of sputtering distance on physical and mechanical properties during gas-flame sputtering of working surfaces of cultivators' paws // Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization). 2013. № 5. P. 32-34.