



05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ И ПЛАЗМЕННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

✉<sup>1</sup> **Кадырметов Анвар Минирович**

д.т.н., заведующий кафедрой машиностроительных технологий Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (Российская Федерация), e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

**Симонова Юлия Эдуардовна**

к.т.н., доцент кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства Воронежского государственного технического университета (Российская Федерация), e-mail: jsim2@bk.ru

**Аннотация.** В статье приведены рекомендации режимов и параметров газотермических и плазменных технологий нанесения покрытий применительно к плоским парам трения, подверженных неравномерным эксплуатационным нагрузкам

**Ключевые слова:** ГАЗОТЕРМИЧЕСКОЕ НАПЫЛЕНИЕ, ОПЛАВЛЕНИЕ

<sup>1</sup> *Автор для ведения переписки*

## FEATURES OF APPLICATION OF GAS-THERMAL AND PLASMA METHODS FOR OBTAINING FUNCTIONAL COATINGS

✉<sup>1</sup> **Anvar M. Kadyrmetov**

doc. of. tech. Sc., Head of the Department of Machine-Building Technology of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (Russian Federation) e-mail: kadyrmetov.a@mail.ru

**Julia E. Simonova**

cand. of. tech. Sc., Associate Professor of the Department of automated equipment of machine-building production of the Voronezh State Technical University (Russian Federation) e-mail: jsim2@bk.ru

**Annotation.** The article provides recommendations for the modes and parameters of gas-thermal and plasma coating technologies in relation to flat friction pairs subject to uneven operational loads

**Keywords:** GAS-THERMAL SPRAYING, REFLOW

### 1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

Надежность покрытий, работающих в условиях трения, как правило, определяется качеством их рабочих поверхностей [1]. Известно, что в процессе эксплуатации такие детали как шейки коленчатых валов, направляющие станин станков, цилиндры двигателей внутреннего сгорания, валки прокатных станов и др. подвержены неравномерному износу по длине и глубине рабочих поверхностей.

Неравномерные изнашивающие эксплуатационные нагрузки, воздействующие на направляющие станин станков, в течение 8 лет составляют величину износа до 100 %, а коэффициент переноса непрямолинейности направляющих на точность изготовления изделий за этот же период, приближается к 0,6 [2, 3]. Можно выделить два основных направления в обеспечении достаточной равномерной износостойкости рабочих поверхностей направляющих станков: упрочнение поверхностей на этапе изготовления, к нему относят химико-термическую обработку, газопламенную обработку, закалку токами высокой частоты и т.п. и восстановление поверх-

ностей при плановом обслуживании станков, когда значение износа превышает допустимое значение с помощью, например, газопламенного напыления проволок, электроискрового легирования с последующим поверхностно-пластическим деформированием покрытия, сочетанием комбинированных процессов отделочно-упрочняющей обработки концентрированными источниками энергии с нанесением композиционных покрытий [4-8].

Условно за один из критериев износостойкости при восстановлении рабочих поверхностей направляющих станков принимают величину микротвердости матрицы материалов пар трения. Так, например, процессом химико-термического упрочнения получают твердость рабочих поверхностей направляющих до HV 800 – 1000, а при объемной закалке с последующим отпуском при глубине закаленного слоя до 5 мм до HRC 58-62. Для получения твердой износостойкой поверхности применительно к низкоуглеродистым сталям используют цементацию с последующей закалкой до значений HRC 60-65. Чугунные рабочие поверхности станков токарной группы подвергают поверхностной закалке с индукционным нагревом токами высокой частоты с получением максимального значения HRC 48-53. Одной из эффективных технологий, а именно, лазерной закалкой чугуновых поверхностей с толщиной зоны не более 0,25 мм, получают значения твердости HRC 58. Однако условия службы направляющих, вследствие неравномерного по интенсивности воздействия на поверхности деталей, приводят к различному износу по длине, что необходимо учитывать при выборе технологии восстановления поверхностей функциональными покрытиями [9].

Решение задачи компенсации неравномерного износа из-за непостоянных по интенсивности эксплуатационных воздействий и, как следствие, увеличение ресурса пар трения должно рассматриваться в направлении совершенствования и модернизации технологий комбинированной обработки поверхностей восстановлением с одновременным или последующим упрочнением этих поверхностей.

## 2 Материалы и методы

Повысить ресурс изнашиваемых деталей возможно с применением прогрессивных методов газотермического напыления, в частности, сверхзвуковым газопламенным напылением, позволяющим получать покрытия с требуемой толщиной до 0,25 мм [10-12]. При этом следует рассмотреть задачу выбора оптимальных параметров газопламенного напыления, обеспечивающих высокую прочность соединения покрытия с основой и низкую пористость.

С увеличением скорости  $V_{ch}$  и температуры  $T_{ch}$  металлических частиц в процессе напыления растет прочность соединения покрытия с металлической основой [13, 14]. Скорость частиц должна иметь малый разброс и для предотвращения разрушения покрытия не должна превосходить 350-400 м/с. Теоретическая оценка зависимости скорости  $V_{ch}$  и температуры  $T_{ch}$  металлических частиц от факторов газопламенного напыления определялась с помощью математической модели, позволяющей оценить с допустимой погрешностью главные параметры процесса [15, 16].

На рисунке 1 приведены расчетные зависимости параметров гетерогенной двухфазной сверхзвуковой струи, определяющие качество наносимого покрытия из порошка на никелевой основе ПГ-СР4 (~85 % Ni, 13 % Cr) фракцией 40 мкм при подаче порошка в закритическую зону сопла.

Распределение параметров газовой фазы в струе описывалось по известным экспоненциальным соотношениям их изменения в зависимости от относительной координаты длины потенциального ядра струи. Скорость и температура частиц описывались уравнениями:

$$\frac{d^2 v_{ch}}{dx^2} = 0,375 \cdot C_d \cdot \frac{\rho}{\rho_{ch}} \cdot \frac{(v-v_{ch}) \cdot |v-v_{ch}|}{r_{ch}}, \quad (1)$$

$$\frac{dT_{ch}}{dt} = \frac{3 \cdot \alpha \cdot (T - T_{ch})}{\rho_{ch} \cdot r_{ch} \cdot C_{pч}}, \quad \text{при } T_{ch} < T_{пл}, \quad \frac{df}{dt} = \frac{3 \cdot \alpha \cdot (T - T_{ch})}{\rho_{ch} \cdot r_{ch} \cdot dH}, \quad \text{при } T_{ch} = T_{пл}, \quad (2)$$

где  $v, v_c$  – скорость газа и частиц соответственно, м/с;  $T, T_c$  – температура газа и частиц соответственно, К;  $T_{пл}$  – температура плавления материала частицы, К;  $C_d$  – коэффициент лобового сопротивления частицы, рассчитываемый по зависимости Рудингера;  $\rho, \rho_c$  – плотность газа и частиц соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, рассчитываемый по зависимости Ранца-Маршалла, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $r_c$  – радиус частицы, м;  $C_{pc}$  – теплоемкость частиц, Дж/К;  $dH$  – удельная теплота плавления, Дж/кг.

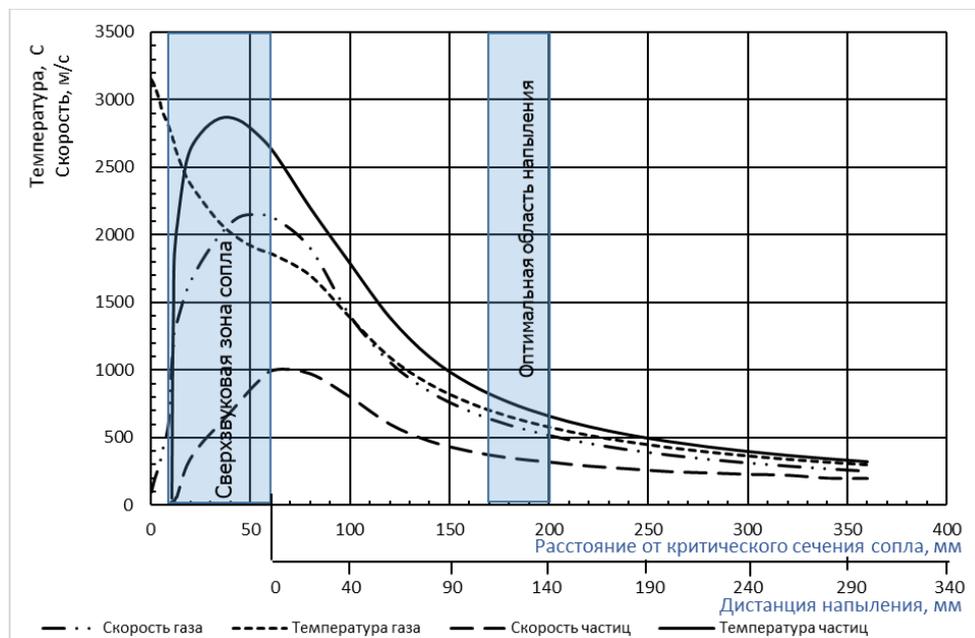


Рисунок 1 – Выбор оптимальных параметров газопламенного напыления, обеспечивающих высокую прочность соединения покрытия с основой и низкую пористость

Остаточные термические деформации станины являются влияющими факторами при решении задачи обеспечения температур в материале направляющих станка, следовательно, надо рассмотреть возможность оплавления покрытия с помощью интенсивных источников тепла, позволяющих за счет высоких скоростей перемещения или минимальном локальном теплоотводе оплавливать покрытие при небольшом нагреве. Этим требованиям удовлетворяет плазменная струя.

Поле температур может быть оценено на основе положений Н. Н. Рыкалина [17] с помощью уравнения предельного состояния процесса распространения тепла в полуограниченном теле в пренебрежении теплоотдачи:

$$T(R, x, \infty) = \frac{q}{2\pi \cdot \lambda \cdot R} \cdot e^{-\frac{v \cdot x}{2a} - \frac{v \cdot R}{2a}}, \quad (3)$$

где  $R$  – радиус-вектор от теплового источника:  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ , м;  $x, y, z$  – координата продольного перемещения источника тепла, перпендикулярная ему координата на поверхности и координата по глубине основы;  $a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/сек;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·град.

На основе решения уравнения (3) с использованием метода отражений и наложения тепловых волн можно оценить значения температур и, в том числе, в крайних местах поверхностей.

Температура любой точки тела  $T_i(x, y, z)$  определяется суммой температур начальных условий и изменением температуры, возникающей в теле при данных граничных условиях с нулевыми начальными условиями. Начальными условиями для каждого последующего прохода пятна напыления является распределение температур от предыдущего прохода. Поле температур складывается из поля, образованного движением теплового источника по оплавливаемой поверхности, взятой как полуограниченное тело, полей, отраженных от граней тела, а

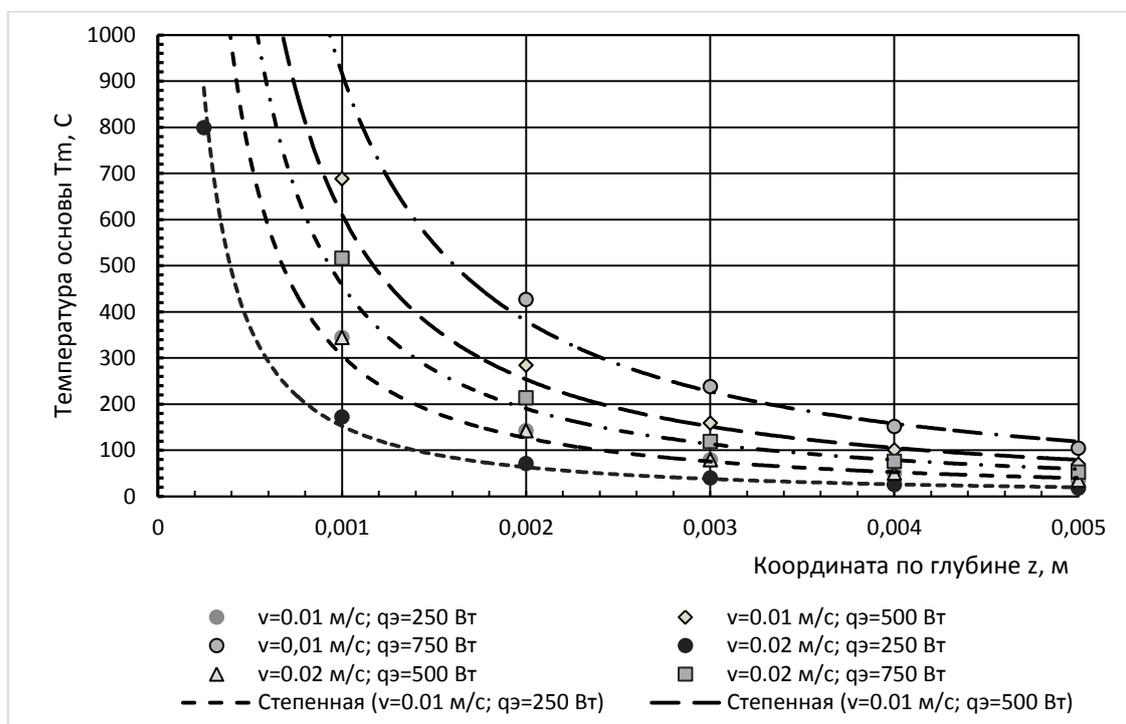
также полей, образованных процессами выравнивания и среднеинтегрального увеличения температуры от предыдущих проходов пятна напыления. Процесс выравнивания по окончании действия источника тепла описывается наложением двух одинаковых по величине и разных по знаку процессов теплонасыщения, сдвинутых по времени на величину запаздывания прохождения максимальной температуры [17].

Максимальная температура  $T_m$  в указанной точке может быть определена выражением:

$$T_m(z) = \frac{2}{\pi \cdot e} \cdot \frac{q}{v \cdot C_{\gamma} \cdot z^2}, \quad (15)$$

где  $q$  – тепловой поток, Вт;  $C_{\gamma}$  – объемная теплоемкость тела, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $v$  – минимально необходимая скорость источника тепла, обеспечивающая заданную температуру  $T_m$ , м/с.

Результаты расчетов по зависимостям для направляющих станков представлены на рисунке 2.



$v$  – скорость движения пятна напыления;  $q_z$  – тепловой поток пятна напыления

Рисунок 2 – Распределение максимальной температуры  $T_m$  основы по глубине  $z$

Профили износа и предлагаемого распределения твердости поверхностей направляющих станков токарной группы представлены на рисунке 3.

Реализация напыления покрытий переменного состава проводилась с применением модифицированного порошкового питателя, обеспечивающего заданное распределение доли упрочняющего элемента в смеси [18, 19]. В качестве материала покрытия применялись целесообразные по износостойкости и стоимости самофлюсующиеся порошковые материалы на никелевой основе с добавками хрома, бора и кремния.

### 3 Результаты исследований

Полученные распределения параметров в процессе газопламенного напыления позволили определить дистанцию напыления и значения геометрии сопла, при которых обеспечиваются максимальные скорости частиц при их незначительном перегреве и условии предотвращения их дробления и разбрызгивания, существенно снижающие качество покрытия.

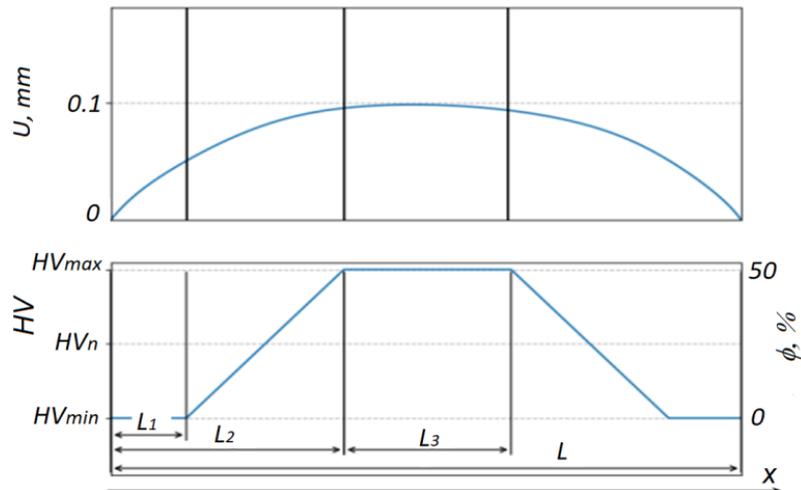
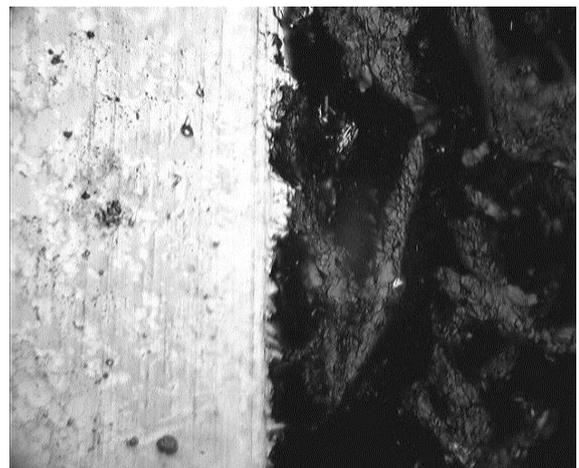
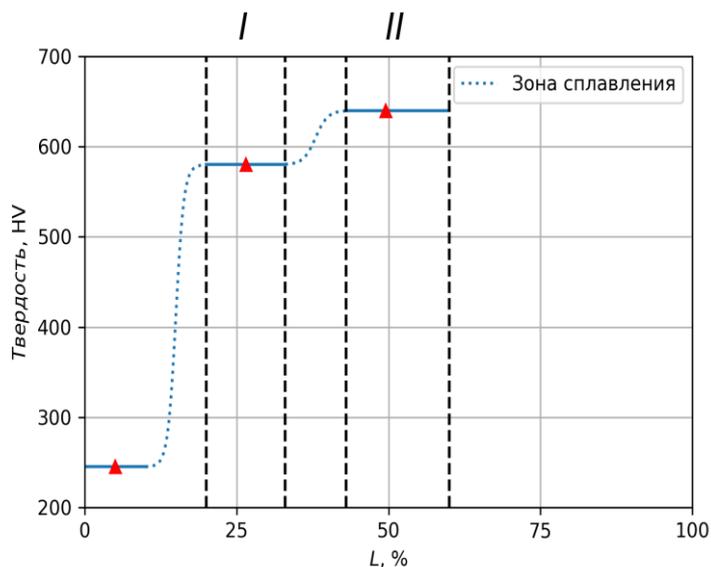


Рисунок 3 – Профиль износа  $U$  поверхности направляющей станка, имеющей постоянную твердость, и функция распределения доли упрочняющего порошка  $\phi$  по длине направляющей  $x$ , обеспечивающей распределение твердости покрытия HV, соответствующей равномерному износу

При оплавлении покрытия из зависимостей следует, что для предотвращения перегрева основы целесообразно использование режимов, обеспечивающих оптимальное отношение теплового потока от пятна напыления к скорости его перемещения. Исследование микротвердости поверхности показало, что её максимальные значения имеет покрытие, напыленное смесью порошков ПР-Н77Х15С3Р2 и ПР-Н65Х25С3Р2 в пропорции 1 : 1 (рис. 4).

Микроструктурные исследования покрытий показали, что по продольному сечению восстановленной поверхности направляющей скольжения достигнуто заданное изменение износостойкости путём изменения требуемого химического состава и структуры напылённого слоя (рис. 5).



$\Delta$  – результаты изменения микротвёрдости после реализации напыления, *I* – напыление порошка ПР-Н65Х25С3Р2, *II* – напыление комбинацией порошков ПР-Н77Х15С3Р2 и ПР-Н65Х25С3Р2

Рисунок 5 – ( $\times 1000$ ) Микроструктура напыленного покрытия

Рисунок 4 – Экспериментальная зависимость микротвёрдости HV по длине  $L$

#### 4 Обсуждение и заключение

Одним из технико-экономических подходов получения поверхностей направляющих станков с заданным распределением износостойкости является сочетание процессов нанесения и упрочнения покрытий, а методом их создания – прогрессивные варианты газотермических и плазменных технологий с решением задачи нанесения покрытий переменного состава в разных зонах направляющих.

Для металлических расплавленных частиц с используемым для газопламенного напыления размером 30-50 мкм пороговым значением скорости движения, предотвращающим дробление частиц, является 350-400 м/с. Рациональная дистанция напыления составила 130-140 мм. При поставляемом заводском фракционном составе частиц 20-60 мкм порошка скорость частиц крупной фракции уменьшается до 1,3-1,5 раз. В этом случае допустимая является дистанция 120-150 мм, при которой достигается максимальной скорости большая доля частиц.

Для предотвращения перегрева основы при оплавлении покрытия рационально проводить его на таких режимах, которые обеспечивают отношение теплового потока от пятна напыления к скорости его перемещения  $q_3 / v$  в интервале 12,5 ... 25 кВт/(м/с) или, что то же самое, в интервале 12,5 ... 25 кДж/м [20]. Результаты расчета позволили определить режим оплавления: скорость движения пятна оплавления – 0,15 м/с, эффективная тепловая мощность в пятне оплавления – 1000 Вт. На этом режиме на глубине 2 мм максимальные значения температур  $T_m$  в средней зоне направляющей станины за пятном оплавления не превышают 400 °С, а на гранях направляющих вследствие отражения тепловых волн температуры возрастают до 430-480 °С. На глубине 4 мм температуры не превышают 150-200 °С.

#### Список литературы

- 1 Суслов, А. Г. Инженерия поверхности деталей / А. Г. Суслов, В. Ф. Безъязычный, Ю. В. Панфилов и др. М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
- 2 Минеев А. С. Статистический анализ износа направляющих металлорежущих станков // Физика, химия и механика трибосистем: межвуз. сб. науч. тр., Вып. 4./ Иван. гос. ун-т. Иваново, 2005.– С. 60-62.
- 3 Утенков В. М. Прогнозирование потери точности металлорежущих станков с направляющими скольжения : Автореф. дис.... д-ра техн. наук : 05.03.01 / В. М. Утенков. – М., 1995. – 29 с.
- 4 Камчицкая И. Д. Техничко-экономическая эффективность новой технологии ремонта направляющих станин токарных станков // Сб. науч. тр. членов БАМЕ. – 2005.– № 5.– С. 28-30.
- 5 Казнов В. Д. Комбинированное упрочнение направляющих скольжения металлорежущих станков // СТИН. – 2001. – № 11. – С. 14-16.
- 6 Казнов, В. Ф. Упрочнение направляющих скольжения металлорежущих станков комбинированным способом / В. Ф. Казнов, Ю. И. Варухин, В. Н. Головнев // Технология машиностроения. – 2002, № 2. – С. 57-61.
- 7 Сердобинцев, Ю. П. Технологические особенности и задачи лазерной обработки упрочняющих покрытий / Ю. П. Сердобинцев, А. Г. Схиртладзе // Технология металлов. – 2007. – № 7. – С. 39-43.
- 8 Ельников, Н. Н. Повышение износостойкости пар трения в динамических системах направляющих станков : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06 / Н.Н. Ельников. – Курск, 1995. – 21 с.
- 9 Симонова, Ю. Э. Повышение эксплуатационных свойств направляющих скольжения путём напыления слоя переменного химического состава / Ю. Э. Симонова, Ю. С. Ткаченко // Справочник. Инженерный журнал. – 2010, № 8. – С. 39-43.
- 10 Кадырметов, А. М. Современные технологии плазменных и газотермических процессов нанесения покрытий в открытой атмосфере / А. М. Кадырметов, Ю. Э. Симонова, А. А. Плахотин, Д. В. Колмаков // Современные материалы, техника и технология : сборник

научных статей 9-й Международной научно-практической конференции (28 декабря 2019 года) / Юго-Зап. гос. ун-т.; в 2-х томах. Том 1. – Курс : Юго-Зап. гос.ун-т, 2019. – С. 226-238.

11 Кравченко, И. Н. Разработка технологии нанесения плазменных покрытий многофункционального назначения / И. Н. Кравченко, М. А. Глинский, Ю. А. Шамарин, Т. А. Чеха // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2017. №6 (82). – С. 63-71.

12 Сарбучев С. Н. Практические применения газотермических технологий нанесения защитных покрытий. Руководство для инженеров [Электронный ресурс] : компания компании "Термал-Спрей-Тек" – М. – Режим доступа : [http://t-s-t.ru/f/prakticheskiye\\_p\\_rimeneniya\\_gazotermicheskikh\\_tekhnologiy\\_naneseniya\\_zashchitnykh\\_pokrytiy\\_rukovodstvo\\_dlya\\_inzhenerov.pdf](http://t-s-t.ru/f/prakticheskiye_p_rimeneniya_gazotermicheskikh_tekhnologiy_naneseniya_zashchitnykh_pokrytiy_rukovodstvo_dlya_inzhenerov.pdf).

13 Кадырметов, А. М. Управление эффективностью газодинамических процессов газопламенного напыления / А. М. Кадырметов, Ю. Э. Симонова, Е. В. Снятков, А. А. Плахотин // В сборнике : Инновационные технологии в транспортном и химическом машиностроении. Материалы XII Международной научно-технической конференции Ассоциации технологов-машиностроителей. 2020. – С. 45-56.

14 Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко и др. – М. : Наука, 1990. – 408 с.

15 Харламов, Ю. А. Моделирование соударения частиц с поверхностью детали при газотермическом нанесении покрытий. – Ворошиловград, 1986. – 74 с. – Деп. в УкрНИИТИ 30.10.86, № 2437 – Ук 86.

16 Галаган, П. В. Исследование процессов газотермического напыления как технологических объектов автоматического управления / П. В. Галаган // Технологии упрочения, нанесения покрытий и ремонта : теория и практика : в 2 ч. Часть 1 : материалы 15-й Междунар. науч.-практ. конф. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – С. 57-63.

17 Рыкалин, Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н. Н. Рыкалин. – М : Машгиз, 1951. – 296 с.

18 Новожилов Н. М. Способ получения сплава заданного химического состава. Авт. свид. № 507428. – «Бюл. изобрет.», 1976, № 11.

19 Горстин В. Ю. Дозатор шнекового типа для подачи смеси порошков в распылительное устройство. Авт. свид. №1098579. – «Бюл. изобрет.», 1984, № 23.

20 Полак, Л. С. Исследование взаимодействия частиц порошка с потоком плазмы в сопле / Л. С. Полак, Н. С. Суров // Физика и химия обработки материалов. – 1969. – №2. – С. 19-29.

## References

1 A. G. Suslov, V. F. Bezyazychnyy, Yu. V. Panfilov et al., Part Surface Engineering, M. : Mashinostroyeniye, 2008.

2. A. S. Mineev. Statistical analysis of wear of guide metal-cutting plants / Physics, Chemistry and Mechanics of Tribosystems: Inter-University Collected Works, Issue. 4. / Ivanovo State University. Ivanovo, 2005. – p. 60-62.

3 V. M. Utenkov. Prediction of precision loss of metal cutting machines with sliding shears : Synopsis of thesis : 05.03.01 / V.M. Utenkov. – Moscow, 1995. – 29 p.

4 I. D. Kamchitskaya. Techno-Economic Efficiency of New Re-Mont Technology of Lathe Guides // BAME Collected Works. – 2005. – № 5. – pp. 28-30.

5 V. D. Kaznov. Combined strengthening of sliding guides of metal-bearing machines // СТИН – 2001. – № 11. – pp. 14-16.

6 V. F. Kaznov. Reinforcement of sliding guides of metal-cutting machines in a method of metal-mining / Kaznov V. F., Varukhin Yu. I., Golovnev V. N. // Technology of mechanical

engineering. – 2002, № 2. – pp. 57-61.

7 Yu. P. Serdobintsev. Technological Features and Tasks of Laser Processing of Down-Rolling Coatings / Serdobintsev Yu. P., Schirtladze A. G. // Technology of Metal-Fishing. – 2007. – № 7. – pp 39-43.

8 N. N. Elnikov. Increased wear resistance of friction pairs in dynamic systems of guiding machines : Synopsis of thesis : 01.02.06 / N. N. Elnikov. – Kursk, 1995. – p. 21.

9 Yu. E. Simonova Improving the operating properties of sliding shears by spraying a layer of variable chemical composition / Yu. E. Simonova, Yu. S. Tkchenko // Handbook. Engineering Journal. – 2010, № 8. – pp. 39-43.

10 A. M. Kadyrmetov, Yu. E. Simonova, A. A. Plakhotin, D. V. Kolmakov, Modern Technologies of Plasma and Gas-Thermal Coating Processes in Open Atmosphere, in: Modern Materials, Equipment and Technology: Collection of Scientific Articles of the 9<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference (December 28, 2019), South-Western State University ; in 2 volumes. Volume 1., Kursk, 2019, – pp. 226-238.

11 I. N. Kravchenko, M. A. Glinskiy, Yu. A. Shamarin, T. A. Chekha, Development of Technology for Applying Plasma Coatings for Multifunctional Purposes in : Bulletin of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Moscow State Agroengineering University named after V. P. Goryachkin". 2017, №. 6 (82). – pp. 63-71.

12 S. N. Sarbuchev. Practical applications of gas-thermal technologies for applying protective coatings. Manual for Engineers [Online Resource] : Thermal-Spray-Tech - M. - Access Mode: [http://t-s-t.ru/f/prakticheskiye\\_primeneniya\\_gazotermicheskikh\\_tekhnologiy\\_naneseniya\\_zashchitnykh\\_pokrytiy\\_rukovodstvo\\_dlya\\_inzhenerov.pdf](http://t-s-t.ru/f/prakticheskiye_primeneniya_gazotermicheskikh_tekhnologiy_naneseniya_zashchitnykh_pokrytiy_rukovodstvo_dlya_inzhenerov.pdf)

13 A. M. Kadyrmetov, Yu. E. Simonova, Ye. V. Snyatkov, A. A. Plakhotin, Efficiency Control of Gas-Dynamic Processes of Flame Spraying in: Innovative Technologies in Transport and Chemical Engineering. Materials of the XII International Scientific and Technical Conference of the Association of Mechanical Engineers, 2020, – pp. 45-56.

14 V. V. Kudinov, P. Yu. Pekshev, V. Ye. Belaschenko et al., Plasma Coating, M. : Nauka, 1990.

15 Yu. A. Kharlamov, Modeling Impact of Particles with Surface of Item during Thermal Spray Coating, Voroshilovgrad, 1986.

16 P. V. Galagan, Investigation of Processes of Thermal Spraying as Technological Objects of Automatic Control in : Hardening, Coating and Repair Technologies : Theory and Practice : in 2 parts. Part 1 : Materials of the 15th Intern. Scientific-Practical Conf., 2013, – pp. 57-63.

17 N. N. Rykalin, Calculations of Thermal Processes during Welding, M: Mashgiz, 1951.

18 N. M. Novozhilov. Method of producing an alloy with a given chemical composition. Author certificate № 507428. – "Bulletin of inventions", 1976, № 11.

19. V. Yu. Gorstin. Screw-type dispenser for supply of mixture of casts to spraying device. Author certificate № 1098579. – "Bulletin of inventions", 1984, – №. 23.

20 L. S. Polak, N. S. Surov, Study of Interaction of Powder Particles with Plasma Flow in a Nozzle, in : Physics and Chemistry of Material Processing, 1969, № 2, – pp. 19-29.

© Кадырметов А.М., Симонова Ю.Э., 2021