

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ
КОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ**

Жачкин Сергей Юрьевич, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства,
Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Россия
e-mail: zhach@list.ru

Трифонов Григорий Игоревич, младший научный сотрудник,
**Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия**
e-mail: trifonov_gi@mail.ru

Аннотация. В данной работе проведены исследования и анализ одного из главных показателей качества формируемого покрытия после плазменного напыления – величина образующихся остаточных напряжений (растяжения и сжатия). Беря за основу кинематические режимы и особенности геометрии поверхностей деталей сельхозмашин, а также критерии формирования толщины напыляемого слоя, разработаны расчетные уравнения по определению остаточных напряжений, возникающих на винтовой, цилиндрической, конической и дисковой поверхностях крупногабаритных деталей агропромышленного комплекса.

Ключевые слова: плазменное напыление, покрытие, остаточные напряжения, поверхность детали, геометрия, коэффициент Пуансона, коэффициенты Ламе, закон Гука, агропромышленный комплекс.

**THE INFLUENCE OF THE SURFACE GEOMETRY OF MACHINE PARTS OF THE AGRO-
INDUSTRIAL COMPLEX ON THE RESIDUAL STRESSES OF COMPOSITE COATINGS OF
PLASMA SPRAYING**

Zhachkin Sergey Yuryevich, Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Automated Equipment of Machine-building production,
Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
e-mail: zhach@list.ru

Trifonov Grigory Igorevich, junior researcher,
**Military Training and Research Center of the Air Force “Air Force Academy named after
Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Voronezh, Russia**
e-mail: trifonov_gi@mail.ru

Abstract. In this paper, studies and analysis of one of the main indicators of the quality of the formed coating after plasma spraying are carried out – the magnitude of the residual stresses formed (stretching and compression). Taking as a basis the kinematic modes and features of the geometry of the surfaces of agricultural machinery parts, as well as the criteria for forming the thickness of the sprayed layer, the calculation equations for determining the residual stresses arising on the helical, cylindrical, conical and disk surfaces of large-sized parts of the agro-industrial complex are developed.

Key words: plasma sputtering, coat, residual stresses, part surface, geometry, Poisson's ratio, Lamé coefficients, Hooke's law, agro-industrial complex.

Введение.

Как показывает практика [6, 11], на сегодняшний день активное развитие сельскохозяйственного сектора, в частности специальной сельскохозяйственной техники, сопряжено с увеличением ресурса эксплуатации и производительности. Следовательно, ввиду варьирования загруженности агропромышленных производств и темпов производственных процессов и технологий, возникает активный рост износа промышленного оборудования и сельхозтехники в целом.

Повышенные нагрузки на сельскохозяйственном производстве, например, где используются шнековые транспортирующие конвейеры, приводят к понижению их ресурса по причине активного

абразивного износа основных машинных узлов и механизмов, следовательно, возникает задача по их восстановлению с одновременным повышением эксплуатационных свойств поверхностного слоя рабочих деталей.

Проведя анализ работ [5, 7, 9], сделан вывод о том, что наиболее перспективным и экономически выгодным способом восстановления и повышения износостойкости деталей сельхоз машин, ввиду своей универсальности и многофакторности, является технология плазменного напыления. Вопросы улучшения физико-механических свойств деталей путем газотермического воздействия на поверхность детали (плазменное напыление) являются востребованными в теоретическом и практическом отношениях.

При этом одним из главных показателей качества формируемого покрытия является величина образующихся остаточных напряжений (растяжения и сжатия).

Актуальность.

Изучение остаточных напряжений у нанесенных покрытий деталей является актуальной и востребованной задачей, поскольку данный показатель качества при высоких показателях приводит к понижению адгезии, отслаиванию покрытия в процессе эксплуатации и, следовательно, к уменьшению надежности работы покрытия и всего механизма в целом. Механизм и кинетика образования остаточных напряжений в покрытиях достаточно изучены, особенно в работах В.А. Барвинка [3] и В.В. Кудинова [8]. В данной работе мы рассмотрим влияние геометрии поверхностей крупногабаритных сельхозмашин на величину формируемых остаточных напряжений покрытия после плазменного напыления.

Цель работы.

Разработать расчетные уравнения остаточных напряжений, возникающих в покрытии после плазменного напыления винтовой и цилиндрической, конической и дисковой поверхностей крупногабаритных деталей агропромышленного комплекса.

Основная часть.

В зависимости от свойств композитного материала и материала детали, подвергаемой напылению, и кроме того, внешних и внутренних факторов, влияющих на формирование покрытия и его толщины, происходит образование сжимающих и растягивающих остаточных напряжений. Считается, что остаточные напряжения оказывают в большей степени негативное влияние на механические, физические, а также на химические характеристики покрытия [3, 10].

Различают макро- и микронапряжения. При эксплуатации в большей степени неблагоприятны макронапряжения, поскольку они могут привести к отслоению материала и трещинам в покрытии, а микронапряжения по своей природе склонны к релаксации. Следовательно, остаточные напряжения оказывают значительное влияние на эксплуатационные характеристики и качество любого нанесенного покрытия на поверхность детали, в том числе и композитного.

В работе [4] приведено уравнение для вычисления остаточного напряжения в покрытии, нанесенном на эталонный образец:

$$\sigma = (\varepsilon_p + \varepsilon_o) \frac{H_o E_o}{H_o E_o + H_p E_p} E_p, \quad (1)$$

где ε_p , ε_o – деформация покрытия и основного материала детали-образца, (мм); H_o , H_p – толщина покрытия и основного материала детали-образца, (мм); E_o , E_p – модуль продольной упругости материала покрытия и детали-образца.

Из уравнения (1) видно, что остаточные напряжения деформируют покрытие (ε_p) и образец (ε_o). При этом, стоит учитывать, что расчетная зависимость записана со следующими допущениями:

покрытие идеально соединено с основным материалом, смещения на границе раздела не происходит;

сечение остается плоским и перпендикулярным оси образца.

Модуль продольной упругости материала покрытия (E_p) ввиду неоднородности может быть определен по строго определенной методике, для которой необходимо изготавливать специальные образцы и применять измерительное оборудование и аппаратуру. Однако, теоретически мы можем смоделировать уравнение по определению модуля продольной упругости материала детали E_o .

Анализируя формулу (1), стоит отметить, что при определении уровня остаточных напряжений используется закон Гука, поскольку поведение материалов (растяжение и сжатие), подчиненные данному закону, встречается во всех случаях упругой деформации. Для более

детальной оценки уровня остаточных напряжений покрытия, учитывая закон Гука, введем уравнения по определению коэффициентов Ламе λ и μ через модули упругости нанесенного слоя и образца, а также коэффициент Пуансона V [7]:

$$\lambda = \frac{EV}{(1+V)(1-2V)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+V)}, \quad \lambda + 2\mu = \frac{E(1-V)}{(1+V)(1-2V)}. \quad (2)$$

С учетом используемых технологических элементов в формуле (1) и коэффициентов Ламе (2), модуль упругости для детали-образца, а также коэффициент Пуансона запишутся:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu},$$

$$V = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}. \quad (3)$$

Для упрощения моделирования уравнений для расчета остаточных напряжений введем условные обозначения:

$$A = \left(\frac{\sqrt{\pi^2 ((d \operatorname{tg} \varphi)^2 + D_1^2)} - \sqrt{\pi^2 ((d \operatorname{tg} \varphi)^2 + D_2^2)}}{\alpha} \right)^2,$$

$$B = \exp\left(-\frac{x^2}{b^2}\right) + \exp\left[-\frac{1}{b^2}(x-s)^2\right] + \exp\left[-\frac{(x+s)^2}{b^2}\right], \quad (4)$$

$$C = \varepsilon_p + \varepsilon_o,$$

где:

d – диаметр цилиндра, (м);

φ – угол подъема, (град);

D_1 – диаметр внешней винтовой линии, (м);

D_2 – диаметр внутренней винтовой линии, (м);

α – угол выреза, (град);

x – координата движения сопла плазматрона относительно плоскости напыления детали, (м);

b – радиус пятна распыла, (м);

s – шаг смещения, (м).

Взяв за основу формулы (1), (3) и (4), а также формообразующие уравнения деталей, учитывающие геометрические параметры поверхностей [1, 2, 10], выводим уравнения для определения остаточных напряжений на винтовой σ_1 , цилиндрической σ_2 , конической σ_3 и дисковой σ_4 поверхностях крупногабаритных деталей машин:

$$\sigma_1 = C \frac{H_1 \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}}{H_1 \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} + \frac{\delta \times \sqrt{\pi b}}{\sqrt{r^2 \gamma^2 + \omega^2}} \times BE_P} E_P,$$

$$\sigma_2 = C \frac{d \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}}{d \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} + \frac{\delta \times \sqrt{\pi b}}{\sqrt{A\gamma^2 + \omega^2}} \times BE_P} E_P,$$

$$\sigma_3 = C \frac{H_2 \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}}{H_2 \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} + \frac{\delta \times \sqrt{\pi b}}{\sqrt{\rho^2 + (tg\psi\beta_z\chi)^2 \gamma^2 + \omega^2}} \times BE_P} E_P,$$

$$\sigma_4 = C \frac{H_2 \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}}{H_2 \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} + \frac{\delta \times \sqrt{\pi b}}{\sqrt{\rho^2 + \beta\chi^2\gamma^2}} \times BE_P} E_P,$$

где δ – коэффициент, характеризующий скорость увеличения толщины покрытия в центре пятна распыла; r – радиус цилиндра, (м); γ – скорость вращения детали, (м/с); ω – продольная скорость перемещения плазматрона, (м/с); ρ – радиальная скорость перемещения инструмента, (м/с); $tg\psi$ – угол раскрытия конуса, (град); χ – цилиндрическая координата, (м); β – шаг спирали траектории перемещения центра пятна напыления по поверхности; β_z – шаг проекции траектории перемещения центра пятна напыления на ось z.

Выводы.

С учетом геометрических особенностей деталей машин и критериев формирования толщины напыляемого слоя и кинематических режимов плазменного напыления разработаны расчетные уравнения по определению остаточных напряжений, возникающих на винтовой, цилиндрической, конической и дисковой поверхностях крупногабаритных деталей агропромышленного комплекса.

Список литературы

1. Trifonov G.I., Penkov N.A., Krasnov A.A., V.G. Gritsyuk Combined Additive Technology in the Restoration of Aircraft Parts // International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy (TPCASE 2018), ISBN: 978-1-60595-617-6, 2018, P. 294–297.
2. Trifonov G.I., Zhachkin S.Yu., Krasnova M.N., Penkov N.A. Estimation of a Heat Distribution in a Part Plasma Coating Process // International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy (TPCASE 2018), ISBN: 978-1-60595-617-6, 2018. P. 298–301.
3. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий / В.А. Барвинок. М.: Машиностроение, 1990. 384 с.
4. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование): Учебное пособие для студентов вузов. М.: Интернет Инжиниринг, 2004. 624 с.
5. Боровский Г.В. Современные технологии обработки металлов / Г.В. Боровский, С.Н. Григорьев, А.Р. Маслов. М.: Машиностроение, 2015. 304 с.
6. Жачкин С.Ю. Анализ износостойкости функционального покрытия в условиях абразивного изнашивания сложнопрофильной детали трения / С.Ю. Жачкин, Е.В. Пухов, Г.И.

Трифонов, Я.В. Комаров, К.В. Загоруйко // Вестник воронежского государственного аграрного университета. Процессы и машины агроинженерных систем. Вып. 3 (62). Т.12. 2019. С. 32–40.

7. Ильющенко А.Ф., Шевцов А.И., Оковитый В.А., Громыко Г.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование. Минск: Беларус. Навука. 2011. 357 с.

8. Кудинов В.В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1992. 432 с.

9. Лещинский Л.К. Плазменное поверхностное упрочнение / Л.К. Лещинский, С.С. Самоутугин, И.И. Пирч, В.И. Комар. К.: Тэхника, 1990. 109 с.

10. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2008. 360 с.

11. Трифонов Г.И. Оценка износа сложнопрофильной детали после плазменного напыления / Г.И. Трифонов // Научно-практический журнал «Современные материалы, техника и технологии». №1 (22). 2019. С. 51–56.