

УДК 621.793.74: 621.791.927.55

UDC 621.793.74: 621.791.927.55

**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЛАЗМЕННЫХ
ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ
КОМБИНИРОВАННЫМ МЕТОДОМ С
ОБКАТКОЙ РОЛИКОМ, ПОЛУЧЕННАЯ НА
ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**EVALUATION OF THE QUALITY OF PLASMA
COATINGS SPRAYED BY THE COMBINED
METHOD WITH RUNNING-ROLLER
OBTAINED THROUGH COMPUTER
SIMULATION**

Кадырметов Анвар Минирович
к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и
эксплуатации машин

Kadyrmetov Anvar Minirovich
Cand.Tech.Sci., associate professor

Посметьев Валерий Иванович
д.т.н., профессор, зав. кафедрой производства,
ремонта и эксплуатации машин

Posmetyev Valeriy Ivanovich
Dr.Sci.Tech., professor

Никонов Вадим Олегович
аспирант
*ФГБОУВПО "Воронежская государственная ле-
сотехническая академия", Воронеж, Россия*

Nikonov Vadim Olegovich
postgraduate student
Voronezh State Forestry Academy, Voronezh, Russia

Посметьев Виктор Валерьевич
к.ф.-м.н., доцент
*Воронежский государственный технический уни-
верситет, Воронеж, Россия*

Posmetyev Viktor Valeriyevich
Cand.Phys.-Math.Sci., associate professor
*Voronezh State Technical University Voronezh,
Russia*

На основе одного из дискретных методов
(Smoothed Particles Hydrodynamics Method) разра-
ботана математическая модель процесса комбини-
рованного упрочнения поверхностей деталей. Мо-
дель позволяет оптимизировать параметры про-
цессов плазменного напыления и механической,
электромеханической обработки

On the basis of one of the discrete methods
(Smoothed Particles Hydrodynamics Method) a math-
ematical model of the combined hardening of surface
details was developed. The model allows optimizing
the processes of plasma spraying, mechanical, electro-
mechanical processing

Ключевые слова: МОДЕЛИРОВАНИЕ,
ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, МЕХАНИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ
ОБРАБОТКА

Keywords: MODELING, PLASMA SPRAYING,
MECHANICAL, ELECTROMECHANICAL
PROCESSING

Для восстановления поверхностей изношенных автомобильных деталей широко используется метод плазменного нанесения покрытий. Для поверхностей деталей, подверженных знакопеременным циклическим нагрузкам, например, для шатунных шеек коленчатого вала, и для поверхностей деталей, подверженных ударным нагрузкам, требуется дополнительная упрочняющая обработка вследствие недостаточных прочностных характеристик. Ранее нами был предложен метод дополнительного упрочнения нанесенного покрытия путем обкатки металлическим роликом с пропусканием электрического тока (сила тока порядка 1000 А) непосредственно после прохода плазмотрона [1].

Электромеханическая обработка приводит к локальному нагреву поверхности и улучшению микроструктуры нанесенного покрытия материала. При этом устраняются трещины и пустоты в покрытии, устраняется окисная пленка между отдельными фрагментами покрытия, улучшается адгезия покрытия к поверхности детали.

Для предварительной оценки эффективности предложенного способа целесообразно использовать математическое моделирование. Математическое моделирование и компьютерные эксперименты позволяют существенно ускорить и удешевить стадию отработки технологического процесса. Поэтому целью данной работы являлась оценка способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей на основе математического моделирования.

В математической модели учтены следующие процессы: образования покрытия в результате плазменного напыления и механической обкатки покрытия роликом; протекания электрического тока через покрытие и выделения тепла в объеме покрытия; распространения тепла в покрытии, покрываемой поверхности и прижимном ролике.

Механическое состояние покрытия моделируется методом, близким к SPH-методу (Smoothed Particles Hydrodynamics) [2]. В рамках данной работы используется одна из разновидностей SPH-метода, в соответствии с которой покрытие рассматривается как совокупность большого количества элементов шарообразной формы диаметром 10 мкм. Моделирование производится в двумерном пространстве XOY . Элементы моделируемой среды взаимодействуют между собой и движутся по законам классической механики [3]. Суммарное количество элементов в модели составляет порядок 10^4 и увеличивается с течением времени по мере поступления новых элементов в области плазменного напыления. Состояние каждого элемента i в модели определяется четырьмя переменными: декартовыми координатами его центра (x_i, y_i) и двумя составляющими скорости (v_{xi}, v_{yi}) . Каждый элемент i испытывает силовое воздействие со стороны каждого из окружающих его элементов j .

В выражение для силы взаимодействия (рис. 1) между двумя элементами закладываются упругие свойства материала покрытия:

$$F_{xij}^y = \begin{cases} c_{ij}(d_{\text{Э}} - r_{ij})(x_i - x_j) / r_{ij}, & \text{если } r_{ij} < d_{\text{Э}}; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_{\text{Э}}; \end{cases}$$

$$F_{yij}^y = \begin{cases} c_{ij}(d_{\text{Э}} - r_{ij})(y_i - y_j) / r_{ij}, & \text{если } r_{ij} < d_{\text{Э}}; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_{\text{Э}}. \end{cases}$$

где F_{xij}^y и F_{yij}^y – декартовы составляющие силы F_{ij}^y ; c_{ij} – коэффициент жесткости упругого взаимодействия элементов; $d_{\text{Э}}$ – диаметр элемента; $d_{\text{О}} = k_{\text{огр}} \cdot d_{\text{Э}}$ – граничное расстояние притяжения.

Кроме того, учитываются составляющие силы, включающие диссипативные силы вязкого трения F_{xij}^B и F_{yij}^B , пропорциональные первой степени скорости относительного движения взаимодействующих элементов.

Движение элемента описывается ньютоновскими уравнениями вида

$$m_{\text{Э}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\text{Э}}} (F_{xij}^y + F_{xij}^B);$$

$$m_{\text{Э}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^{N_{\text{Э}}} (F_{yij}^y + F_{yij}^B) - m_{\text{Э}} g ,$$

где $m_{\text{Э}}$ – масса элемента; t – время; $N_{\text{Э}}$ – количество элементов покрытия; F_{ij}^y и F_{ij}^B – упругая и вязкая составляющие силы взаимодействия между элементами i и j ; g – ускорение свободного падения.

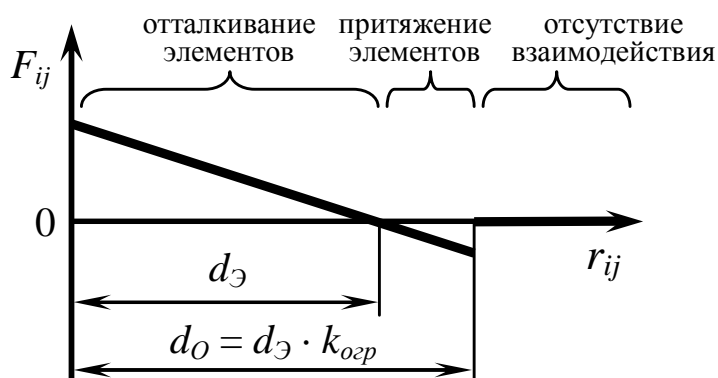


Рис. 1. Зависимость силы упругого взаимодействия элементов от расстояния между ними

Расчет протекания электрического тока через покрытие производится на основе решения уравнения Пуассона. Для моделирования распространения тепла в покрытии используется уравнение теплопроводности, с учетом процессов нагрева покрытия от струи плазмы, выделения тепла при пропускании электрического тока, теплоотвода в покрываемую поверхность и прижимной ролик. Уравнения Пуассона и теплопроводности решаются численно с использованием случайной самоупорядочивающейся фрагментируемой сетки, узлами которой являются центры элементов покрытия.

В целом, модель представляет собой систему дифференциальных и алгебраических уравнений и решается численно модифицированным методом Эйлера-Коши. Шаг интегрирования системы дифференциальных уравнений составляет $\Delta t = 0,00002$ с. Алгоритм расчета представлен схемой (рис. 2).

Для удобства исследования математической модели и для проведения с ней компьютерных экспериментов разработана компьютерная программа на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7 [4]. Программа предназначена для моделирования способа упрочнения поверхностей деталей путем комбинации плазменного нанесения покрытия с обкаткой роликом. Программа позволяет найти оптимальные параметры комбинированного способа упрочнения: скорость движения системы плазмотрон-ролик, положение ролика по отношению к плазмотрону и поверхности, параметры поверхности ролика. В процессе работы программа непрерывно выводит на экран схематичное изображение напыляемого материала, поверхности, ролика, по которым можно судить о качестве нанесения покрытия (рис. 3). Программа рассчитана на использование компьютера с процессором не ниже Pentium 2,6 ГГц, и объемом оперативной памяти не менее 512 Мбайт. Исходный текст программы имеет объем 10 кбайт.

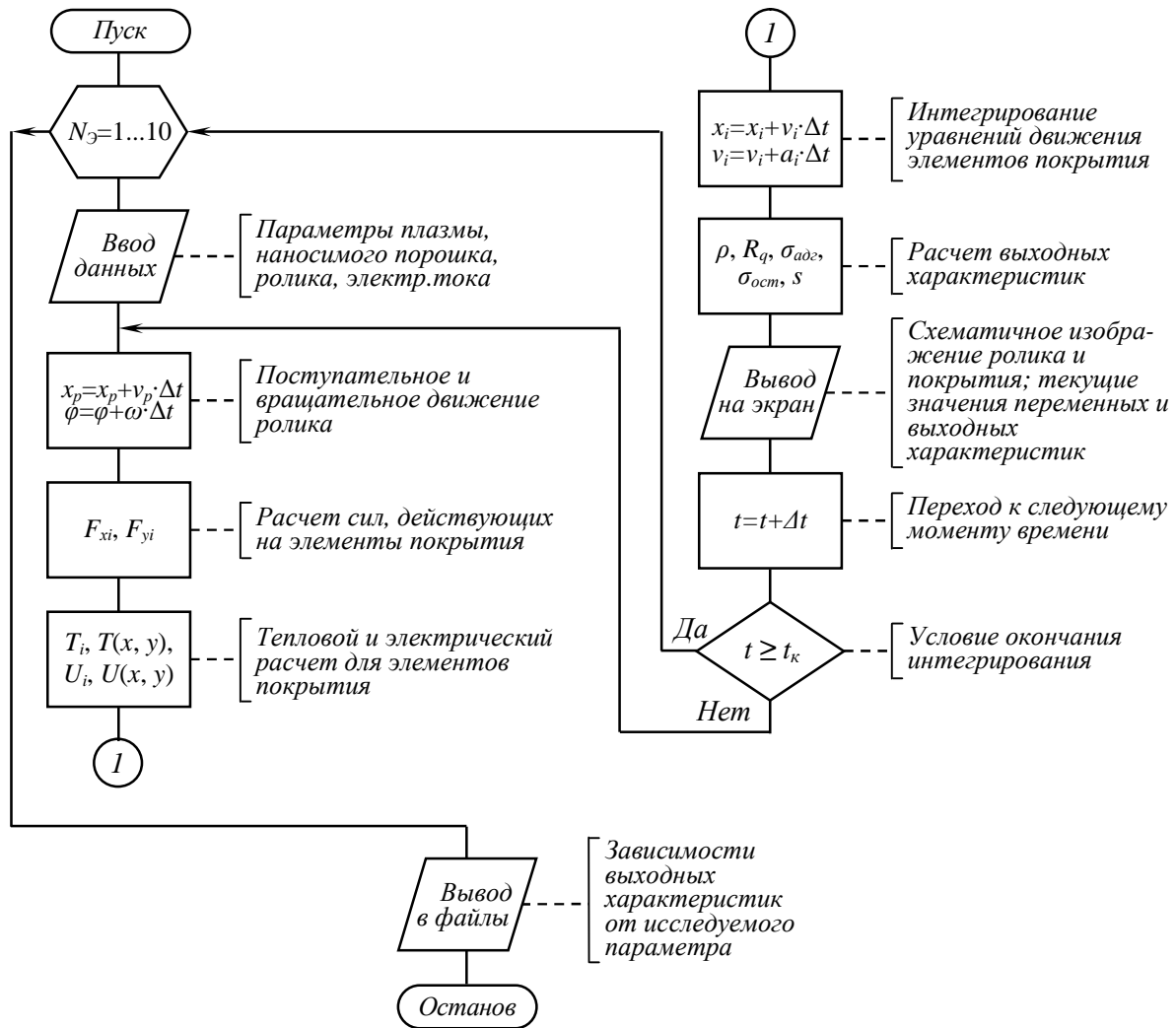


Рис. 2. Схема алгоритма моделирования способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей: $N_{Э}$ – количество компьютерных экспериментов; x_p, v_p – координата и скорость горизонтального движения ролика; T_i и U_i – температура и электрический потенциал i -го элемента; $T(x, y)$ и $U(x, y)$ – пространственное распределение температуры и электрического потенциала в модельной системе; ρ – плотность образующегося покрытия; R_q – шероховатость поверхности; $\sigma_{ког}$ – когезионная прочность покрытия; $\sigma_{ост}$ – величина остаточных напряжений; t_k – время проведения компьютерного эксперимента

Последовательность проведения компьютерного эксперимента была следующей. Обкатывающий ролик двигался относительно восстанавливаемой поверхности в горизонтальном направлении с постоянной поступательной v_p и вращательной ω скоростью (рис. 4). Нанесенный слой покрытия перемещается в направлении ролика, при механическом взаимодействии с покрытием ролик

приподнимается над исходной поверхностью, в то же время, оказывая задаваемое обкатывающее усилие на покрытие. После нанесения первого слоя покрытия длиной 4 см, ролик сдвигается в исходное состояние. Затем на первый слой аналогичным образом наносится второй слой покрытия. После нанесения второго слоя производится оценка физико-механических свойств сформированного покрытия: плотности, шероховатости, когезии, внутренних напряжений. Для определения когезии производится испытание на отрыв верхних слоев покрытия от нижних (рис. 4, внизу). Затем строится диаграмма "напряжение-деформация", и максимальная величина напряжения (в предотрывном состоянии) считается напряжением когезии.

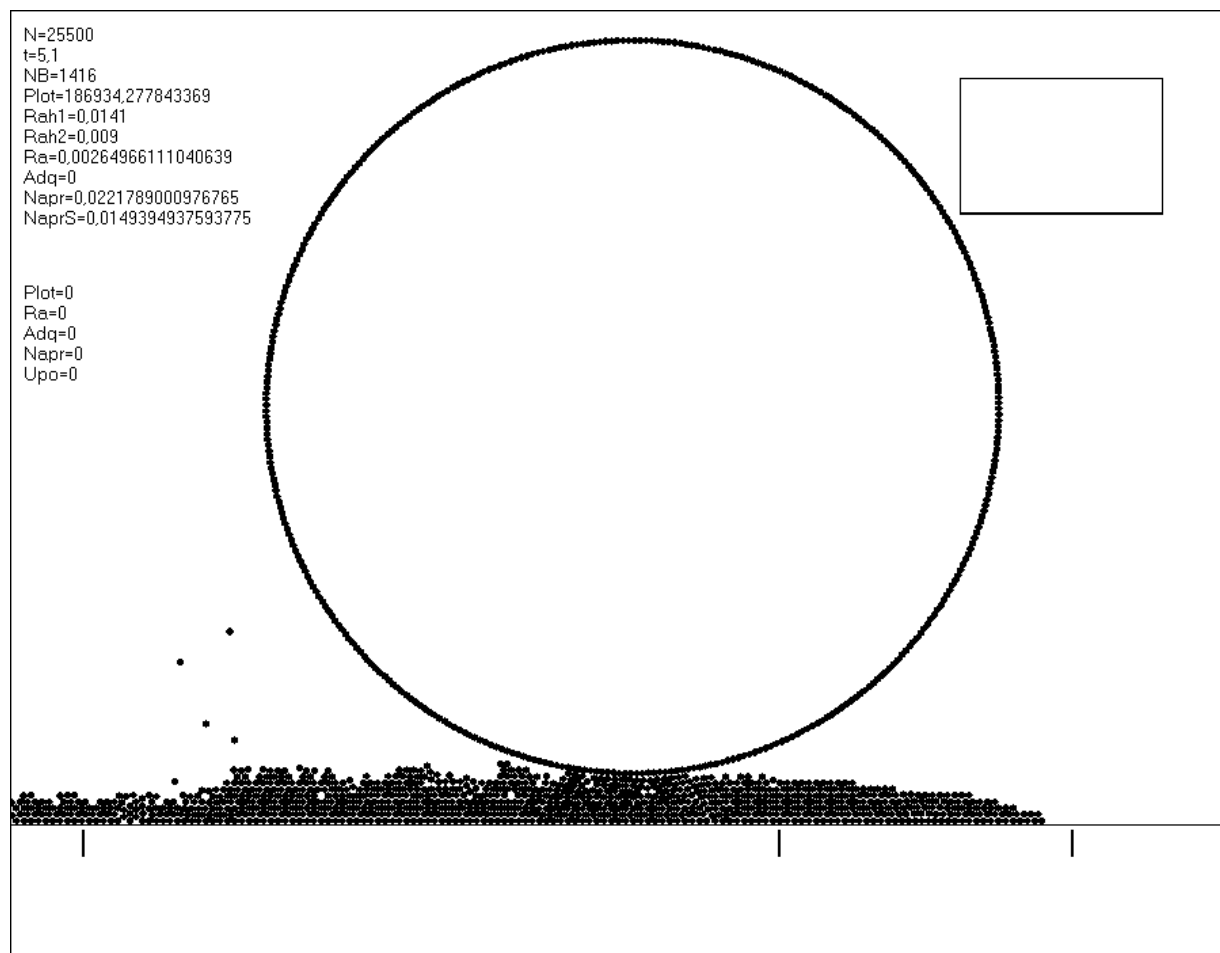


Рис. 3. Изображение, выводимое на экран компьютера в процессе обработки покрытия программой для моделирования способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей

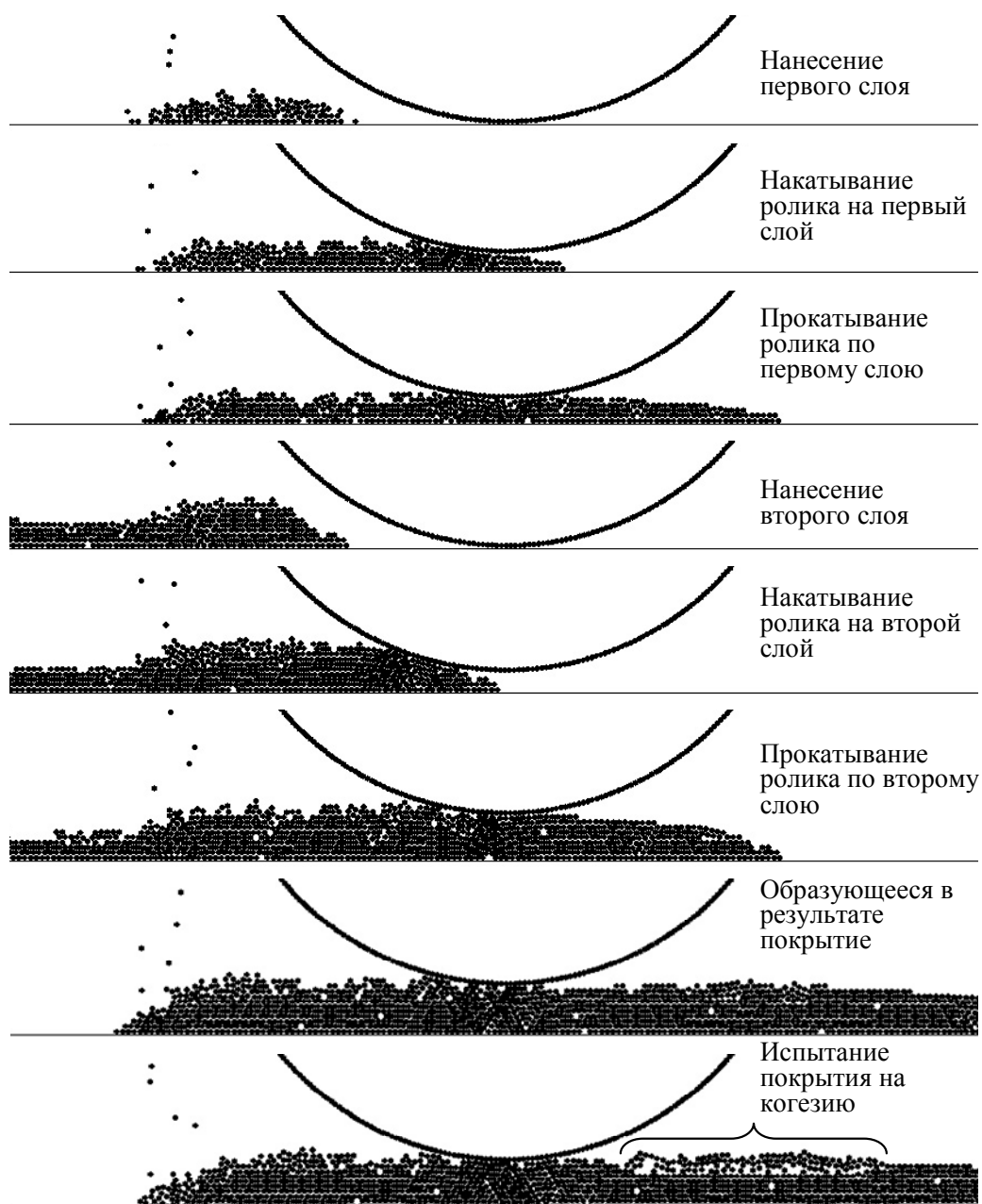


Рис. 4. Порядок проведения компьютерного эксперимента

Механическое воздействие обкатывающего ролика приводит к перестройке структуры покрытия (рис. 5). В частности, поверхность покрытия после прохода ролика становится более ровной: пустоты поверхности заполняются за счет смещения выпуклостей. Кроме того, действие ролика приводит к тому, что взаимное расположение элементов покрытия становится более упорядоченным. Однако при недостаточно прогревом покры-

тии проявляются и отрицательные стороны механического воздействия: покрытие после прохода ролика имеет зёрненную структуру со значительным количеством небольших трещин.

Параметры компьютерной модели были близки к следующим реальным параметрам процесса нанесения покрытия: подложка – сталь; порошок ПН55Т45; диаметр частицы порошка (элемента модели) 10 мкм; эффективный радиус ролика 10 мм; характерная толщина одного слоя покрытия 50 мкм; скорость перемещения плазматрона и ролика относительно поверхности 1 см/с; расход порошка 10 мг/с; характерное давление ролика 100 МПа.

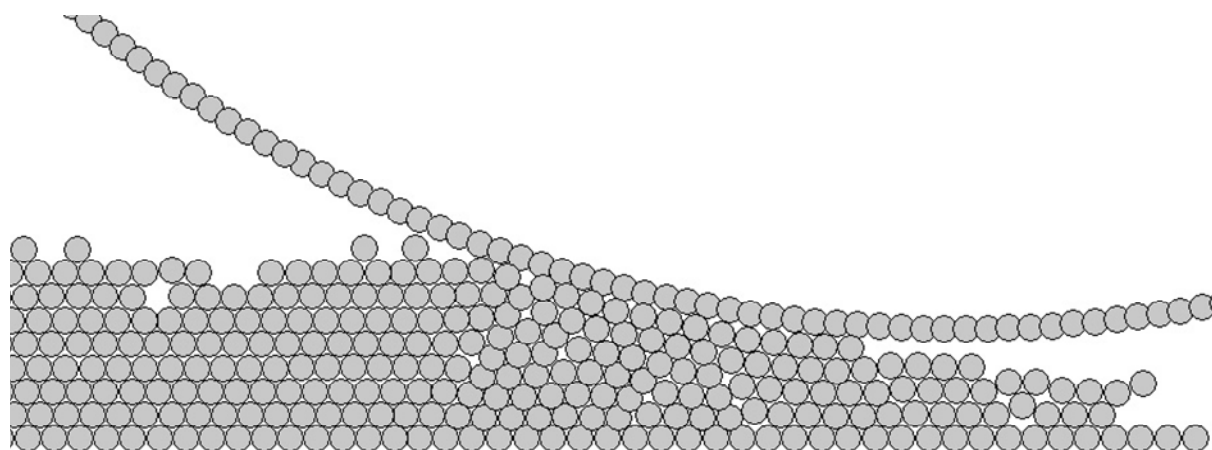


Рис. 5. Изменение структуры покрытия при проходе обкатывающим роликом второго слоя покрытия

Построена карта распределения электрического потенциала в рабочей зоне ролика при условии, что поверхность детали имеет потенциал 0 В, а ролик – потенциал 6 В (рис. 6). Сравнивая рисунки 5 и 6 можно прийти к выводу, что выступающая область с потенциалом 6 В находится в том месте покрытия, которое испытывает существенную перестройку структуры под действием ролика. Сильное сжатие элементов покрытия приводит к увеличению площади контакта между элементами и, следовательно, к уменьшению электрического сопротивления. Поэтому в соответствии с за-

конами Ома и Джоуля-Ленца в данной области наблюдаются наибольшая сила тока и наибольший разогрев. При этом, наибольший разогрев покрытия при электромеханической обработке производится как раз в том месте, где он и необходим – в месте основного входа механических напряжений.

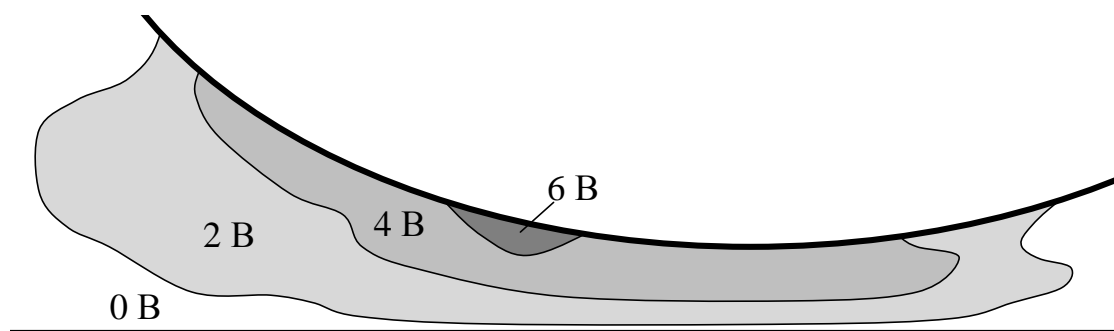


Рис. 6. Распределение электрического потенциала в покрытии вблизи ролика

С помощью разработанной модели проведена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли расход порошка в диапазоне от 0,001 до 5 г/с. Расход порошка, при одинаковой скорости движения плазмотрона относительно неподвижной восстанавливаемой поверхности, определяет толщину слоя покрытия (рис. 7). Анализируя рисунок, можно заметить, что при любой толщине слоя механическое действие ролика приводит к существенному снижению шероховатости поверхности.

В приведенных ниже сериях графиков результаты компьютерных экспериментов аппроксимированы *B*-сплайнами с помощью программы "Microcal Origin 7".

Плотность покрытия увеличивается с увеличением расхода порошка (рис. 8, *a*), так как при малом расходе покрытие имеет островковую структуру и с увеличением расхода сплошность покрытия увеличивается. Обкатка роликом покрытия позволяет увеличить его плотность ориентировочно на 5 % по сравнению с обычным плазменным напылением. Шероховатость поверхности покрытия существенно снижается при обкатке (на 40-70 %, рис. 8, *б*). Кроме того,

шероховатость незначительно растет с увеличением Q_{II} , так как с увеличением толщины покрытия увеличивается амплитуда неровностей поверхности.

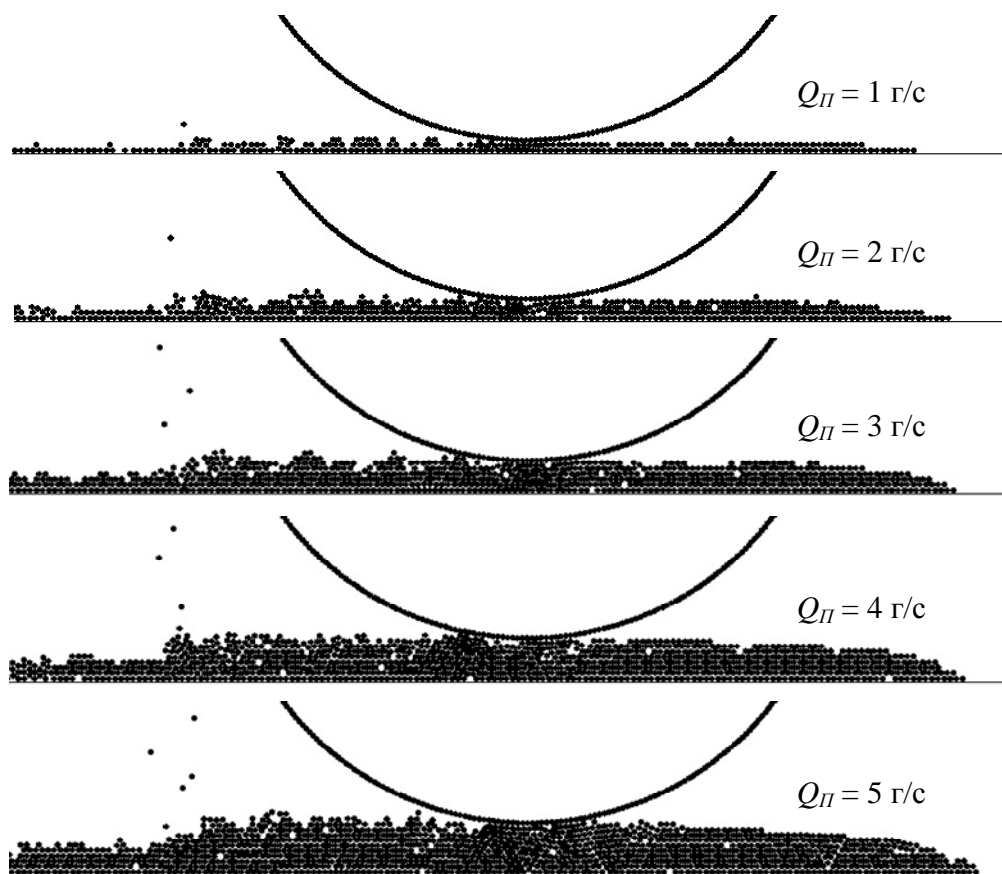


Рис.7. Влияние расхода порошка Q_{II} на толщину покрытия за один проход без пропуска электрического тока через покрытие

В результате обкатки роликом снижается когезионная прочность покрытия (рис. 8, в). Данный отрицательный эффект выражен тем сильнее, чем больше толщина покрытия при расходах порошка менее 3 мг/с. Снижение когезионной прочности может служить косвенным подтверждением увеличения остаточных растягивающих напряжения в покрытии в направлении, перпендикулярном его поверхности. Аналогичный отрицательный эффект механического воздействия получен в отношении остаточных напряжений (рис. 8, г). Стоит также отметить, что средняя величина остаточных напряжений растет с увеличением толщины покрытия (или, что

практически то же самое, с увеличением расхода порошка Q_{II}). Это имеет место во всем интервале расхода порошка Q_{II} несмотря на повышение силы когезии при $Q_{II} \geq 3$ мг/с (рис. 8, в).

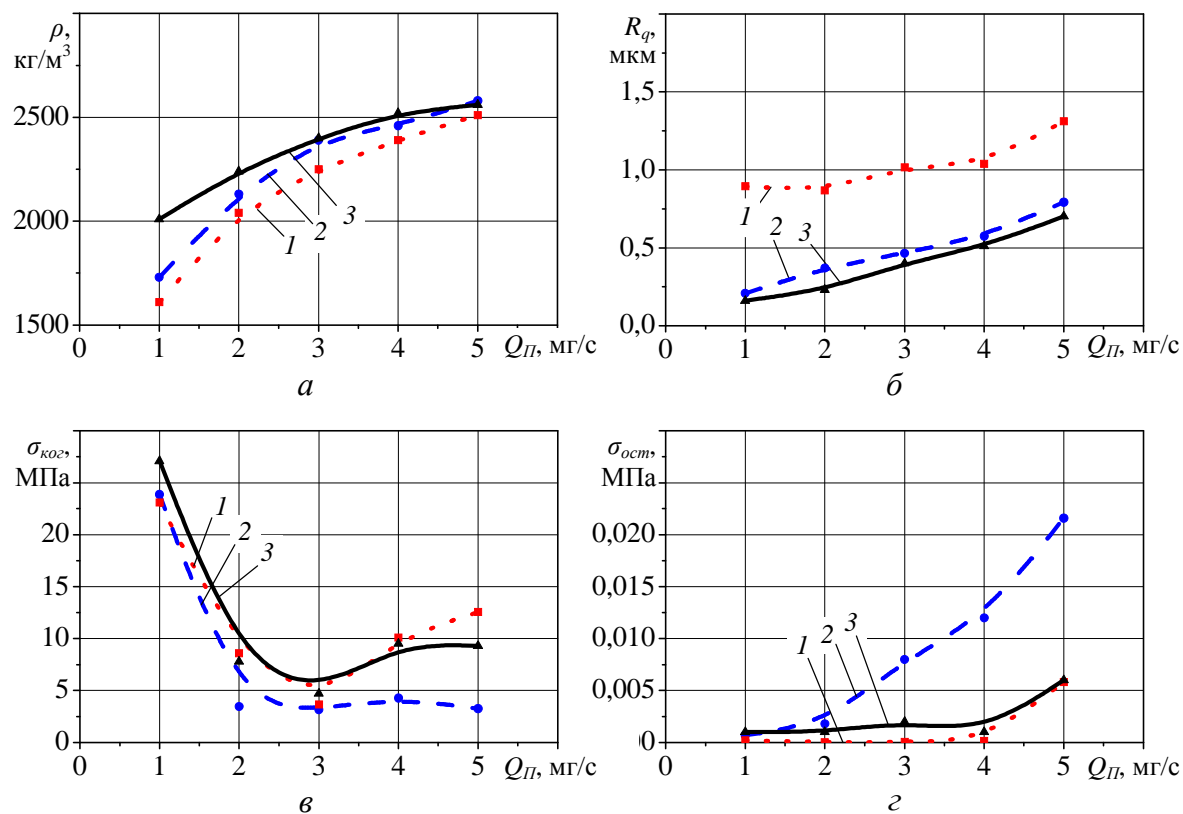


Рис. 8. Влияние расхода порошка Q_{II} на плотность образующегося покрытия (а); шероховатость поверхности (б); когезионную прочность покрытия (в) и величину остаточных напряжений (г): 1 – без обкатки роликом; 2 – обкатка роликом без пропуска электрического тока; 3 – электромеханическая обработка роликом

Обобщая полученные результаты, можно заключить, что механическая обработка позволяет улучшить плотность покрытия и снизить шероховатость, однако приводит к снижению когезии и росту внутренних напряжений. Электромеханическая обработка непосредственно после плазменного нанесения покрытия позволяет устранить отрицательный эффект механической обработки, заключающийся в создании дополнительных внутренних повреждений покрытия. Об этом свидетельствует близость линии 3 на рисунке 8, в, г к линии 1. При этом сохраняется положи-

тельный эффект механической обработки, заключающийся в увеличении плотности и снижении шероховатости (линия 3 на рисунке 8, а, б).

Для исследования влияния силы прижатия обкатывающего ролика к поверхности детали проведена серия компьютерных экспериментов, в которой варьировали давление обкатки P_P на уровнях 0,1; 0,3; 1,0; 3,0; 10; 30; 100; 300; 1000 МПа (рис. 9).

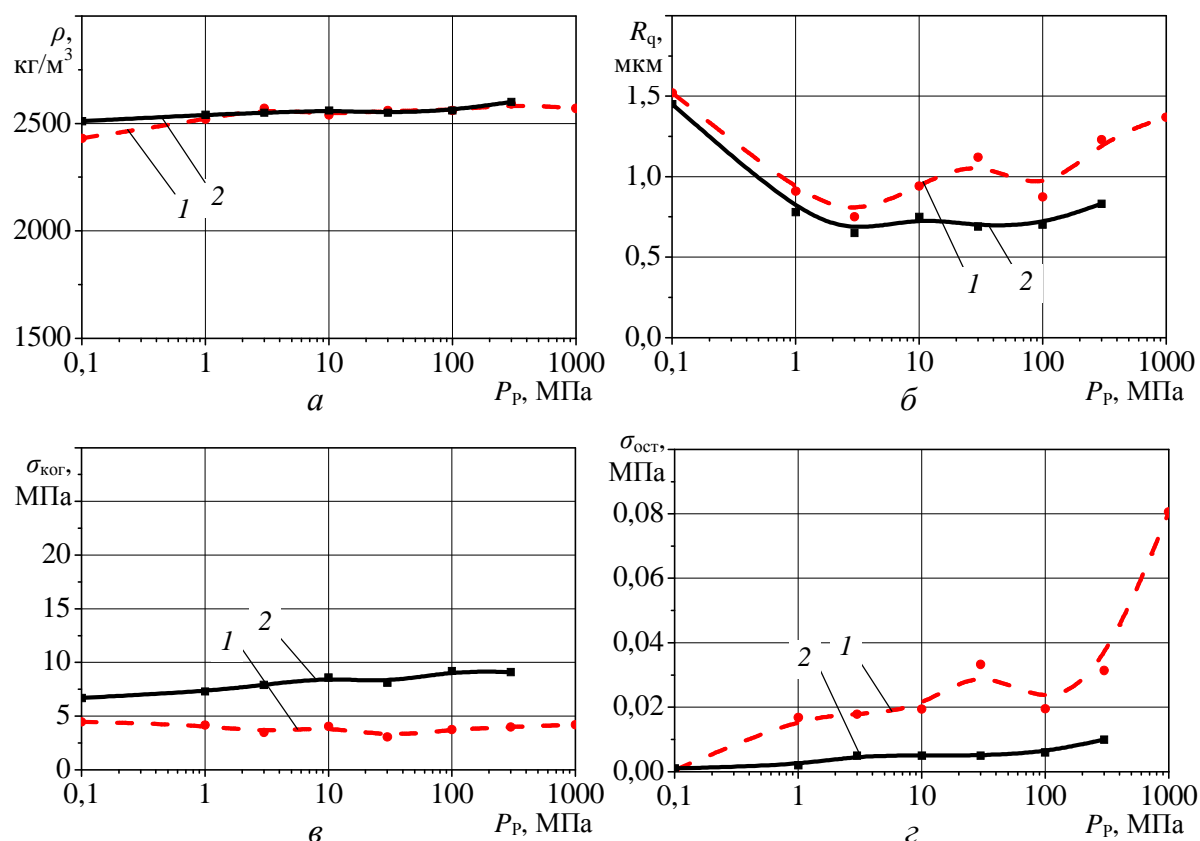


Рис. 9. Влияние давления обкатки ролика P_P на плотность образующегося покрытия (а); шероховатость поверхности (б); когезионную прочность покрытия (в) и величину остаточных напряжений (г): 1 – обкатка роликом без пропуска электрического тока; 2 – электромеханическая обработка роликом

Анализируя графики, можно заметить, что плотность покрытия и когезионная прочность практически не зависят от давления обкатки (рис. 9, а, в). При увеличении давления обкатки P_P шероховатость поверхности сначала уменьшается (P_P менее 3 МПа), что связано с увеличивающейся способно-

стью ролика распределять выступающие части покрытия между впадинами (рис. 9, б). При давлении же обкатки более 100 МПа происходит механическое разрушение покрытия, поэтому в данном диапазоне P_P наблюдается рост шероховатости. Наименьшая шероховатость поверхности наблюдается в довольно широком диапазоне P_P от 2 до 100 МПа. Остаточные напряжения $\sigma_{ост}$ растут с увеличением P_P (рис. 9, в).

Сравнивая линии 1 и 2 на рисунке 9, можно отметить, что использование электромеханической обработки, по сравнению с чисто механической обработкой, приводит к улучшению показателя R_q ориентировочно на 20 %, показателя $\sigma_{ког}$ – примерно в 2 раза, показателя $\sigma_{ост}$ – примерно в 3 раза.

Таким образом, проведенные оценки на основе компьютерного моделирования позволяют заключить, что механическая (либо электромеханическая) обработка плазменного покрытия приводит к повышению его плотности ориентировочно на 10 % и снижению шероховатости ориентировочно вдвое. Электромеханическая обработка по сравнению с чисто механической, приводит к повышению когезионной прочности покрытия примерно вдвое и снижению остаточных напряжений в 2-5 раз.

Список литературы

1 Посметьев, В. И. Управление качеством плазменных покрытий деталей машин на основе модуляции параметров плазматрона и электромеханической обработки [Текст] / В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов, А. Ф. Мальцев // Мир транспорта и технологических машин. – Орел : Госуниверситет – УНПК, 2011. – № 4(35). – С. 23-31.

2 Premoze S., Tasdizen T., Bigler J. et al. Particle Based Simulation of Fluids // Eurographics, 2003. – Vol. 22. – № 3. – P. 103-113.

3 Гулд, Х Компьютерное моделирование в физике [Текст] / Х. Гулд, Я. Тобочник // в 2 ч. Ч.2 : Пер. с англ. – М. : Мир, 1990 – 400 с.

4 Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013612101 от 14.02.13 г. Программа для моделирования способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей [Текст] / В. О. Никонов, А. М. Кадырметов, В. И. Посметьев, В. В. Посметьев ; правообладатель ФГБОУ ВПО ВГЛТА. – № 2012661430; заявл. 21.12.2012 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.02.2013.