

УДК 621.793.74:621.791.927.55

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ
КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

В. И. Посметьев, А. М. Кадырметов, В. О. Никонов (ВГЛТА)

Для восстановления поверхностей изношенных деталей автомобилей широко используется метод плазменного нанесения покрытий. Однако большинство способов по этому методу обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение (остаточные напряжения, недостаточная плотность, адгезионная и когезионная прочность покрытия и др.). С целью устранения этих недостатков был предложен метод дополнительного упрочнения нанесенного покрытия путем прокатки 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 разработка математической модели комбинированного способа упрочнения поверхностей деталей и первичная оценка эффективности способа.

В математической модели учтены следующие процессы: образования покрытия в результате плазменного напыления и механической прикатки 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 двухмерном простран-

стве 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. В выражение для силы взаимодействия между двумя элементами закладываются упругие свойства материала покрытия, а также диссипативные силы вязкого трения. 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 . Движение элемента описывается ньютоновскими уравнениями вида

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

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

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

Расчет протекания электрического тока через покрытие осуществляется следующим образом. На каждом шаге численного интегрирования в модели определяется распределение электрического поля в покрытии путем решения уравнения Пуассона на сетке, узлами которой являются элементы покрытия. В соответствии с определенными электрическими потенциалами элементов и их проводимостью в модели имитируется элементарное протекание тока между элементами за время Δt (шаг численного интегрирования), приводящее, в свою очередь, к изменению потенциалов элементов. 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.

Таким образом, 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 на рисунке 1.

Для удобства исследования математической модели и проведения с ней компьютерных экспериментов разработана компьютерная программа "Программа для моделирования способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей" на языке Object Pascal в интегрированной среде программирования Borland Delphi 7 [4, 5]. Программа предназначена для моделирования способа упрочнения поверхностей деталей путем комбинации плазменного нанесения покрытия и прокатки прижимным роликом.

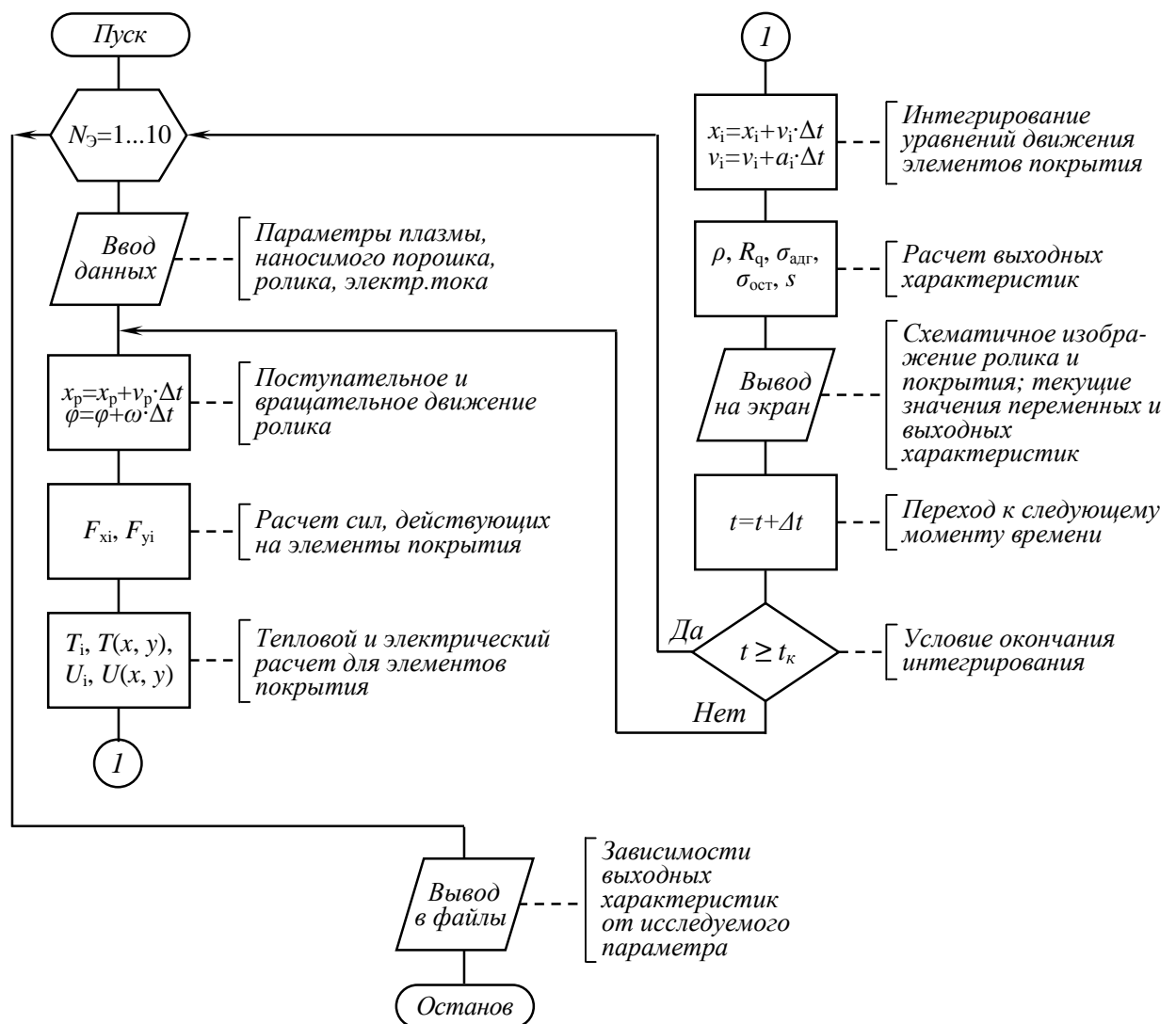


Рисунок 1 – Схема алгоритма моделирования способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей

Программа позволяет найти оптимальные параметры комбинированного способа упрочнения: скорость движения системы плазмotron-ролик, положение ролика по отношению к плазмotronу 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. 2). 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.

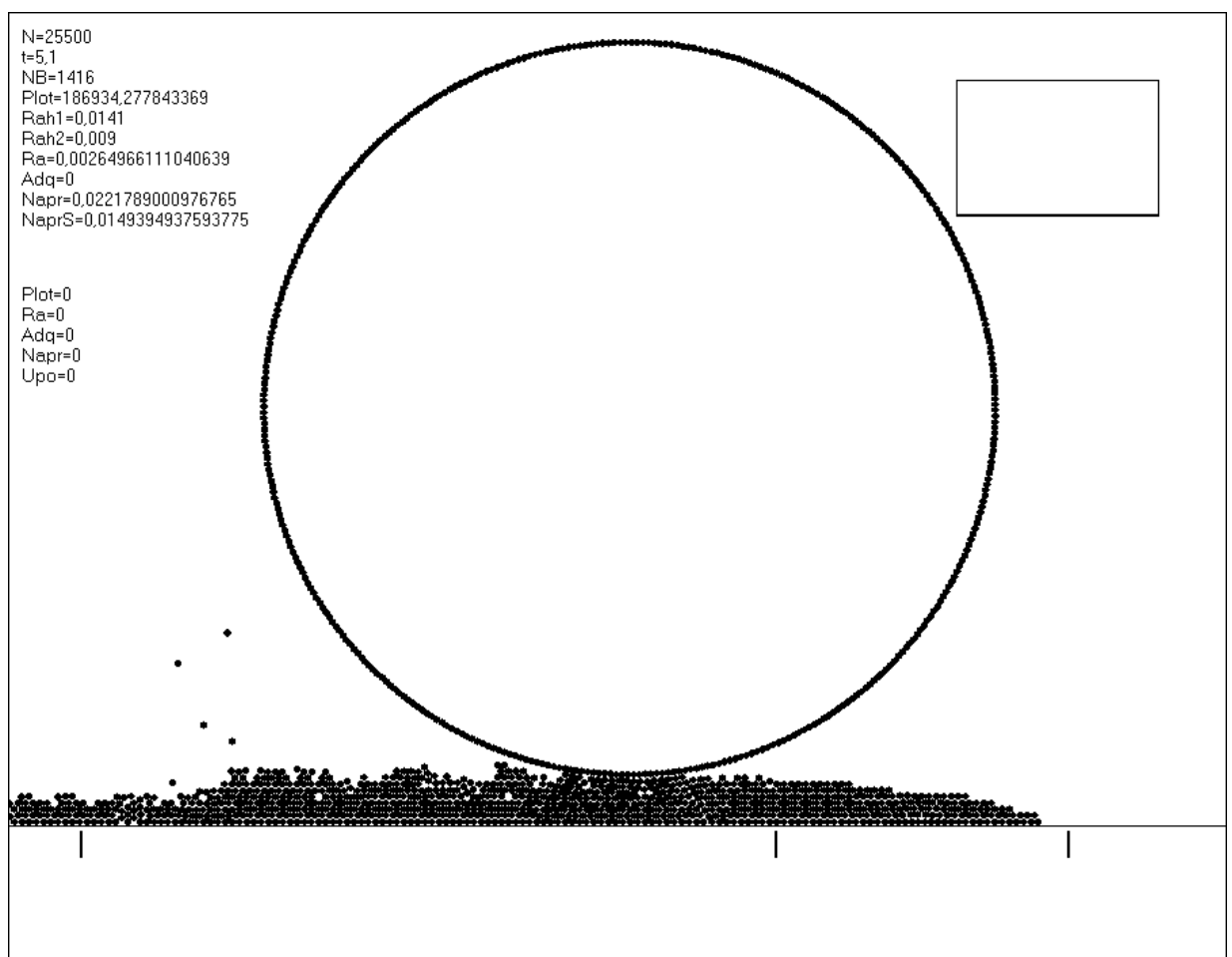


Рисунок 2 – Изображение, выводимое на экран компьютера в процессе обработки покрытия программой для моделирования способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей

Последовательность проведения компьютерного эксперимента была следующей. Прикатывающий ролик двигался относительно восстанавливаемой поверх-

ности в горизонтальном направлении с постоянной поступательной v_p и вращательной ω скоростью (рис. 3). Наносимый слой покрытия перемещается в направлении ролика, при механическом взаимодействии с покрытием ролик приподнимается над исходной поверхностью, в то же время, оказывая задаваемое прикатывающее 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. 3, внизу). Затем строится диаграмма "напряжение-деформация", и максимальная величина напряжения (в предотрывном состоянии) считается напряжением когезии.

Механическое воздействие прикатывающего ролика приводит к перестройке структуры покрытия (рис. 4). 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 покрытия проявляются и отрицательные стороны механического воздействия: покрытие после прохода ролика имеет зёрнистую структуру со значительным количеством небольших трещин.

С помощью разработанной модели проведена серия компьютерных экспериментов, в которой изменяли расход порошка от 1 до 5 г/с. Расход порошка, при одинаковой скорости движения плазмотрона относительно неподвижной восстанавливаемой поверхности, определяет толщину слоя покрытия (рис. 5). Анализируя рисунок, можно заметить, что при любой толщине слоя механическое воздействие ролика приводит к существенному снижению шероховатости поверхности.

Плотность покрытия повышается с увеличением расхода порошка (рис. 6, а). Прикатывание роликом покрытия позволяет увеличить его плотность ориентировочно на 5 % по сравнению с обычным плазменным напылением. Шероховатость поверхности покрытия существенно снижается при прокатывании (на 40-70 %, рис. 6, б). Кроме того, шероховатость незначительно растёт с увеличением Q_{II} .

В результате прикатывания роликом снижается когезионная прочность покрытия (рис. 6, в). Данный отрицательный эффект выражен тем сильнее, чем

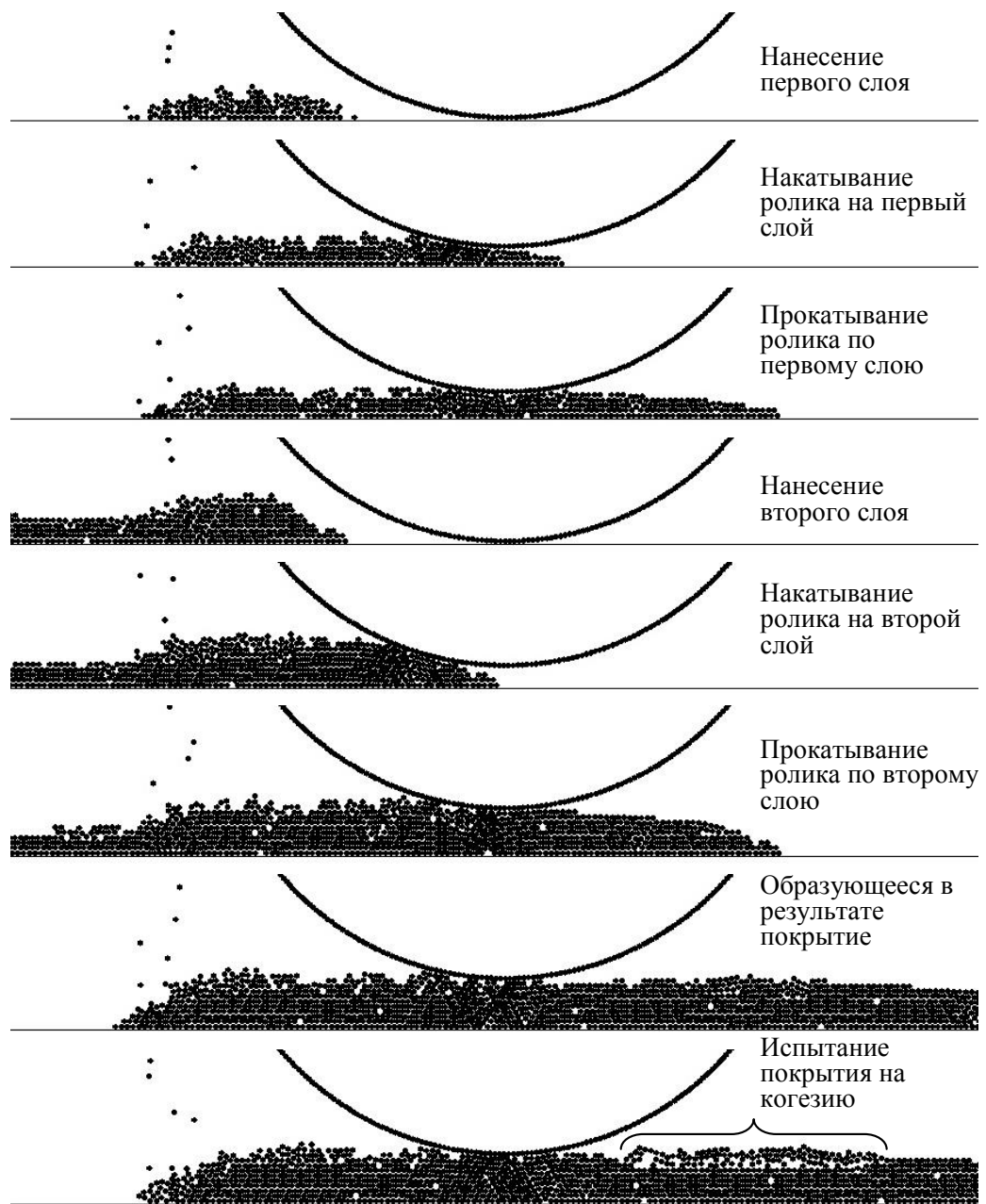


Рисунок 3 – Порядок проведения компьютерного эксперимента

больше толщина покрытия. Аналогичный отрицательный эффект механического воздействия получен при анализе остаточных напряжений (рис. 6, з). Стоит также отметить, что средняя величина остаточных напряжений растет с увеличением толщины пленки или, что практически то же самое, с увеличением расхода порошка $Q_{\text{п}}$.

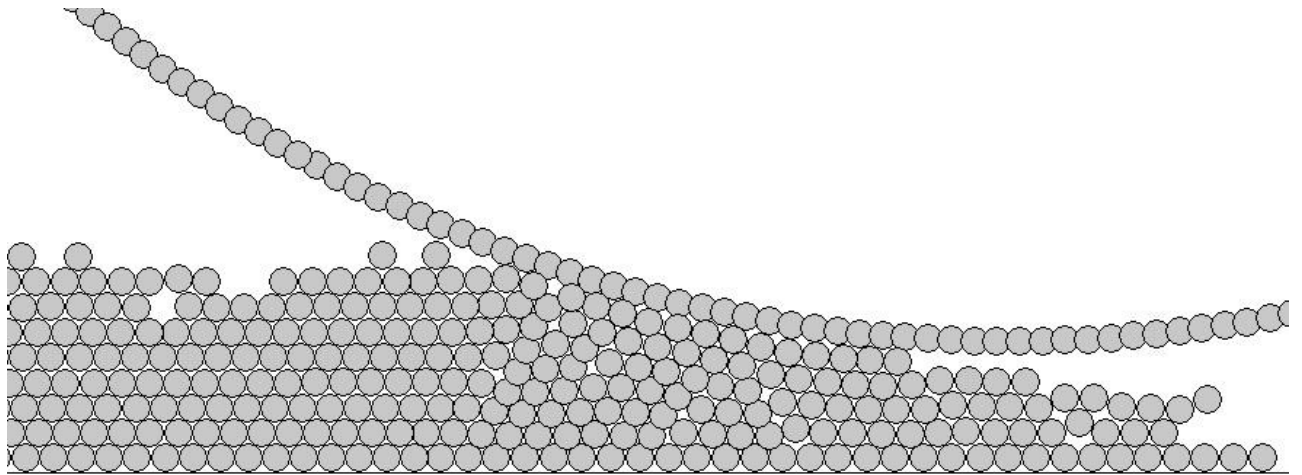


Рисунок 4 – Изменение структуры покрытия при проходе прикатывающего ролика

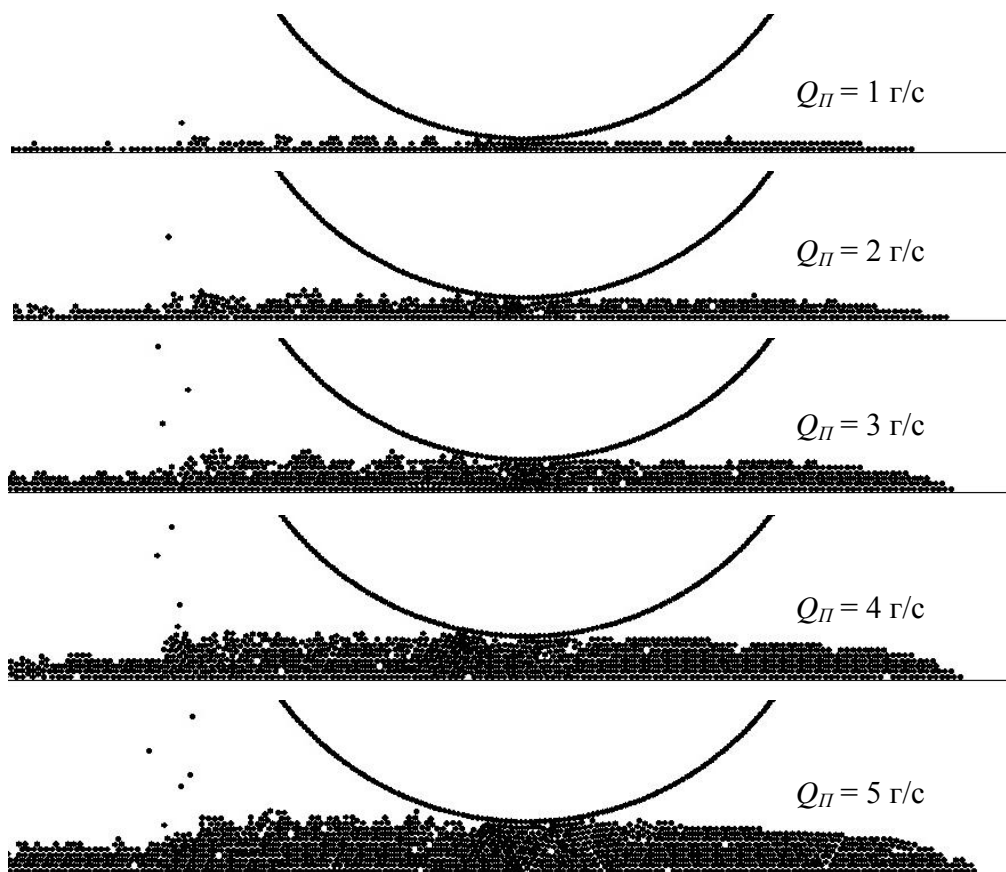


Рисунок 5 – Влияние расхода порошка $Q_{п}$ на толщину покрытия

Обобщение полученных результатов позволяет заключить, что механическая обработка дает возможность улучшить плотность покрытия и снизить шероховатость, однако приводит к снижению когезии и росту внутренних напря-

жений. Электромеханическая обработка непосредственно после плазменного нанесения позволяет устранить отрицательный эффект механической обработки, заключающийся в создании дополнительных внутренних повреждений покрытия, при сохранении положительного эффекта механической обработки – увеличение плотности покрытия и снижение шероховатости.

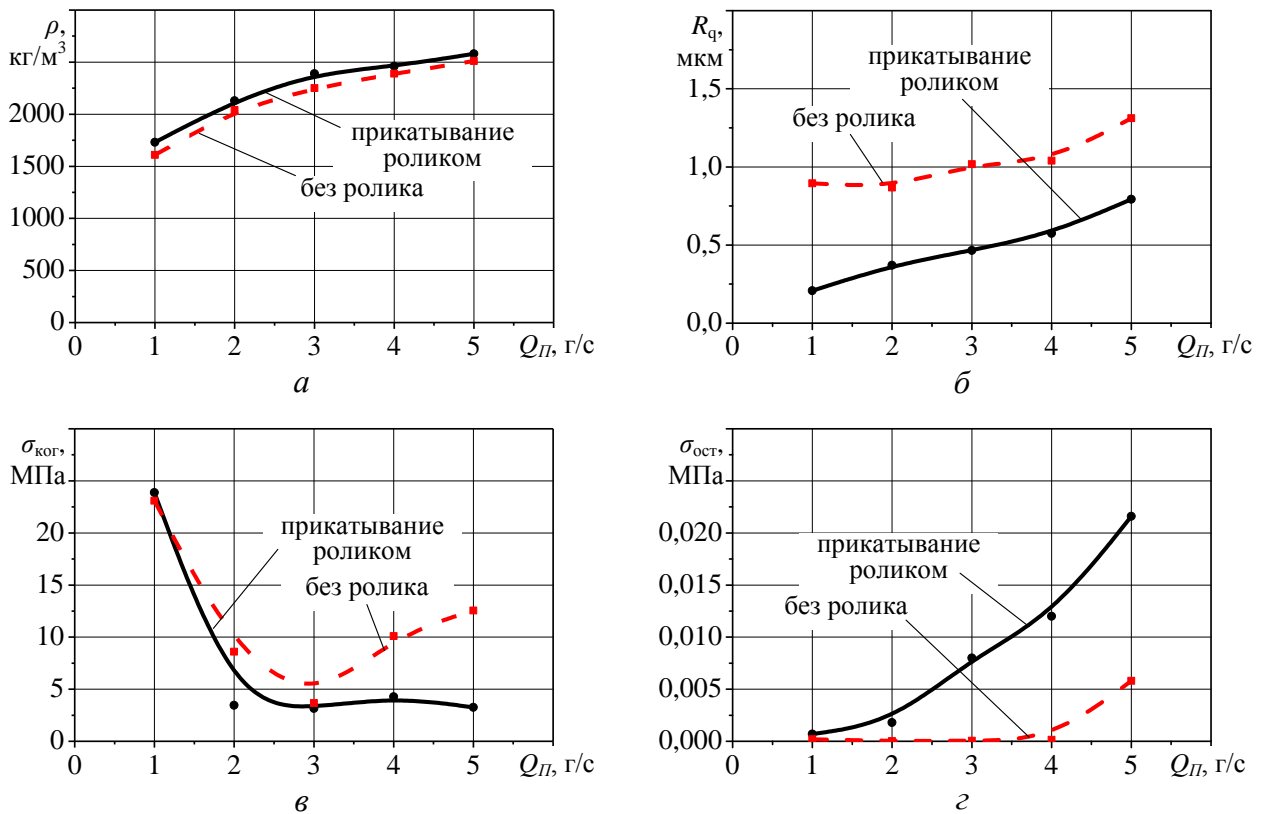


Рисунок 6 – Влияние расхода порошка $Q_{п}$ на плотность образующегося покрытия – а; шероховатость поверхности – б; когезионную прочность пленки – в и величину остаточных напряжений – г

Таким образом, разработанная имитационная модель способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей позволяет изучить стадии нанесения многослойного покрытия, а также влияние расхода порошка на физико-механические параметры покрытия.

Библиографический список

- 1 Посметьев, В. И. Управление качеством плазменных покрытий деталей машин на основе модуляции параметров плазмотрона и электромеханической

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

3 Гулд, Х. Компьютерное моделирование в физике / 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. Программа для моделирования способа комбинированного упрочнения поверхностей деталей [Текст] / В. О. Никонов, А. М. Кадырметов, В. И. Посметьев, В. В. Посметьев ; правообладатель ВГЛТА. – № 2012661430; заявл. 21.12.2012 ; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 14.02.2013.5