



ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВОГО НАПЫЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

В. А. УЛЬШИН, д-р техн. наук, **М. Ю. ХАРЛАМОВ**, инж. (Восточноукраин. нац. ун-т им. В. Даля, г. Луганск)

Предложен метод определения оптимальных технологических параметров детонационно-газового напыления покрытий по критерию энергетических характеристик напыляемых частиц порошка, основанный на использовании генетического алгоритма. Показаны преимущества данного подхода по сравнению с другими методами решения задач оптимизации, с помощью компьютерного моделирования продемонстрирована его эффективность.

Ключевые слова: детонационно-газовое напыление, моделирование, оптимизация, скорость частиц, температура частиц, генетический алгоритм

На условия формирования покрытий значительное влияние оказывают скорость и температура напыляемых частиц. В свою очередь энергетические характеристики частиц при детонационно-газовом напылении покрытий (ДГНП) зависят от многих технологических параметров. Поэтому для получения покрытий с заданными свойствами необходимо нахождение оптимальных параметров. Поиск оптимизированных условий напыления осложняется из-за большого количества этих параметров, а также в связи с невозможностью выделить процесс, определяющий конечные результаты. На практике задача нахождения оптимальных параметров технологического процесса ДГНП решается путем проведения множества дорогостоящих экспериментов. Аналитические методики нахождения оптимизированных условий напыления не дают четких рекомендаций и заключаются либо в получении частного оптимума путем варьирования технологических факторов по одному из возможных параметров оптимизации [1], либо ориентировочного алгоритма построения технологического процесса (в зависимости от используемого материала частиц), что в итоге также сводится к варьированию одних технологических параметров при условии постоянства других [2]. В итоге при решении конкретной задачи получения покрытия с заданными свойствами указанные методы могут лишь дать оценочные значения технологических параметров и предполагают проведение натуральных экспериментов.

Целью настоящей работы являлось создание метода оптимизации технологических режимов ДГНП с учетом всех параметров, оказывающих влияние на энергетические характеристики напыляемых частиц, а тем самым и на формирование покрытия. К ним относятся [1, 3, 4]: химический состав порошка; состав используемой газовой смеси; грануляция порошка; навеска порошка; начальное расположение частиц в стволе детонационной установки (ДУ); геометрические параметры ствола ДУ; дистанция напыления.

Далее более подробно остановимся на выборе параметров и критериев оптимизации. При проведении расчетов геометрические параметры ствола ДУ и химический состав порошка считались заданными, а остальные параметры оптимизировались по ряду причин. Так, выбор состава напыляемого порошка в основном определяется условиями, в которых будет работать напыляемое изделие, что исключает данный параметр из числа варьируемых. Актуальной является задача разработки оптимальных по конструкции детонационных камер сгорания (стволов ДУ) для напыления покрытий. Однако ввиду многообразия возможных вариантов их конструктивного исполнения (использование ДУ с составными частями, изменяющими форму продольного и поперечного сечения ствола, применение различных насадок и пр.) пространство поиска оптимальных параметров значительно увеличивается и задача становится практически неразрешимой. Из теории газотермического напыления следует, что скорость и температура напыляемых частиц являются определяющими параметрами при формировании покрытия. При этом большую роль играет пространственно-временное распределение указанных величин в зоне формирования покрытия. В то же время данные о необходимом характере распределения параметров частиц во времени и пространстве для получения покрытий с заданными свойствами в литературе отсутствуют. Причиной этого является недостаточная изученность физико-химических процессов образования покрытия при газотермическом напылении, вследствие чего при решении конкретных задач применяются упрощенные математические модели, лишь косвенно отражающие структурные особенности напыляемых покрытий. Поэтому в ряде случаев можно говорить об усредненных значениях скорости и температуры частиц порошка при взаимодействии с напыляемой поверхностью. Данные характеристики использовались также и при оптимизации технологического процесса ДГНП в настоящей работе. В дальнейшем с развитием теории взаимодействия импульсной двухфазной струи и основы при ДГНП критерии оптимизации могут расширяться, что будет способствовать выбору оптимальных технологических

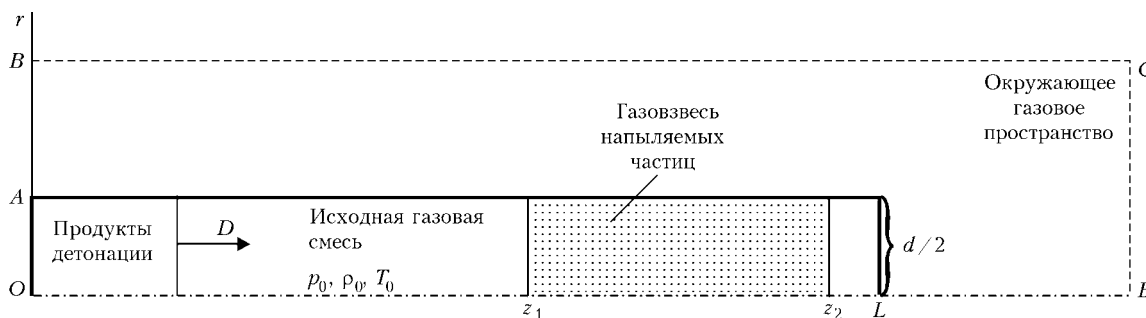


Рис. 1. Схема ствола ДУ и расчетной области (см. обозначения в тексте)

режимов напыления, обеспечивающих получение покрытий с заданной структурой и свойствами.

Отдельно следует рассмотреть такой оптимизируемый параметр, как грануляция порошка. В известных работах по детонационному напылению обычно рассматривается либо динамика поведения одиночных частиц в потоке продуктов детонации (ПД), либо течение монодисперсной газовзвеси. При выборе технологических режимов напыления использование последнего подхода предпочтительнее, поскольку позволяет учесть такой фактор, как влияние навески порошка на параметры двухфазного потока. В работах [1, 5 и др.] исследуется динамика поведения полидисперсных потоков, при этом используется ряд упрощений (рассматривается несколько ассамблей частиц с разными диаметрами, частицы в ассамблее имеют одну координату и скорость и др.), что не позволяет считать распределение частиц порошка по размерам непрерывным процессом. Повышение точности и достоверности результатов моделирования возможно при одновременном описании динамики поведения большого количества частиц. Это осуществлено в работе [6], в которой моделировали движения частиц порошка в плазменной струе для 3000 частиц. К недостаткам моделей, описывающих поведение полидисперсных порошков, следует отнести значительное увеличение времени решения задач. На современном уровне развития средств вычислительной техники это неприемлемо для решения задач оптимизации, требующих проведения расчетов большого количества возможных вариантов значений оптимизируемых параметров. В этих целях целесообразно использовать математические модели, описывающие поведение монодисперсного порошка при ДГНП, и при этом рассматривать средний диаметр частиц в напыляемой фракции.

Таким образом, перед исследователями поставлена задача выбора состава используемой газовой смеси, среднего диаметра порошковых частиц, навески порошка, начального расположения частиц в стволе ДУ, дистанции напыления при установленных геометрических параметрах ствола ДУ и состава порошка для придания напыляемым частицам заданных значений средней скорости и температуры при взаимодействии с напыляемой поверхностью.

В настоящей работе использовали модель из работы [7], позволяющую определять пространственно-временные параметры потока напыляемых частиц как внутри ствола ДУ, так и в пространстве

между срезом ствола и напыляемым изделием, в том числе и при использовании стволов ДУ переменного сечения. Моделирование производили при следующих условиях. Ствол ДУ длиной L , имеющий цилиндрическую форму с внутренним диаметром d , либо ствол с переменным сечением, имеющий выходной диаметр d , заполнен частично или полностью смесью газов при начальном их давлении p_0 , плотности ρ_0 и температуре T_0 . Внутри ствола в области (z_1, z_2) , причем $0 \leq z_1 < z_2 \leq L$, находится газовзвесь твердых сферических частиц. При инициировании у левого закрытого конца ствола формируется стационарная детонационная волна (ДВ), распространяющаяся вправо со скоростью детонации и D (рис. 1). При частичном заполнении ствола детонационной смесью оставшаяся часть ствола занимает не реагирующий газ. В этом случае после выхода ДВ на контактную границу газовой смеси – реагирующий газ (ГС–НГ) происходит распад ДВ на ударную, движущуюся по НГ, и волну разрежения, движущуюся в обратном направлении по ПД. После достижения ударной или детонационной волной правого открытого конца ствола начинается истечение ПД и дисперсных частиц в окружающее газовое пространство.

Граничные условия ставились следующим образом. На оси симметрии, стенках ствола ДУ ставятся условия непротекания газа и дисперсных частиц. До тех пор, пока ДВ не достигла контактной границы ГС–НГ, ее параметры находятся по формулам для фронта стационарной ДВ (правое граничное условие). После достижения ДВ контактной границы на открытых границах расчетной области AB и BC ставятся условия свободного протекания фаз, на правой границе CE , согласно [8], ставится условие непротекания для газовой фазы и свободного проникновения для дисперсной фазы, т. е. достигший преграды порошок напыляется на нее.

Использовали следующие допущения: давление создается только газом; влиянием порошковых частиц пренебрегаем; вязкость и теплопроводность фаз учитывается лишь в процессах межфазного взаимодействия; расстояния, на которых параметры течения меняются, значительно больше размеров частиц и расстояний между ними; частицы сферические монодисперсные и не вступают в химические реакции с ПД; дробление и столкновение частиц отсутствуют; ПД до начала истечения рассматриваются как реагирующая среда, имеющая в каждой точке равновесный химический



состав, после начала истечения — как инертный газ с постоянным показателем адиабаты; влияние частиц на характеристики ДВ не учитывается.

Система уравнений двухмерного осесимметричного нестационарного движения газозвеси имеет следующий вид [9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho_i v_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho_i v_i^2)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_i v_i u_i)}{\partial z} + \alpha_i \frac{\partial p}{\partial r} &= (-1)^i f_r n, \\ \frac{\partial(\rho_i u_i)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho_i v_i u_i)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_i u_i^2)}{\partial z} + \alpha_i \frac{\partial p}{\partial r} &= (-1)^i f_z n, \\ \frac{\partial(\rho_2 e_2)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho_2 e_2 v_2)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_2 e_2 u_2)}{\partial z} &= qn, \\ \sum_{i=1}^2 \left[\frac{\partial(\rho_i E_i)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho_i v_i E_i)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\alpha_i p v_i)}{\partial r} + \right. \\ &\left. + \frac{\partial(\rho_i u_i E_i)}{\partial z} + \frac{\partial(\alpha_i p u_i)}{\partial z} \right] = 0, \\ \rho_i &= \alpha_i \rho_i^0, \quad E_i = e_i + (v_i^2 + u_i^2)/2, \\ n &= 6\alpha_2 / (\pi \delta^3), \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \rho_2^0 = \text{const}, \quad i = 1, 2, \end{aligned}$$

где v_i и u_i — составляющие скорости соответственно в радиальном r и осевом z направлении; e_i , E_i — удельные внутренняя и полная энергии i -й фазы; p — давление газа; f_z , f_r — составляющие силового взаимодействия со стороны газа на дисперсную частицу в цилиндрических координатах; q — интенсивность притока тепла к поверхности отдельной частицы; n — количество дисперсных частиц в единице объема смеси. Доля объема смеси, занятая i -й фазой, характеризуется ее объемным содержанием α_i . Каждой точке объема смеси ставятся в соответствие средняя плотность фаз ρ_i , характеризующая массу фазы в единице объема, и истинная плотность фаз ρ_i^0 , характеризующая плотность составляющих их веществ. Индексы $i = 1$ принадлежат газовой, а $i = 2$ — дисперсной фазам.

Использовались уравнения состояния идеального газа: $p = \rho_i^0 R T_1 / \mu_1$, $e_1 = e_1(T_1)$, где R — универсальная газовая постоянная; μ_1 — молекулярная масса ПД; T_1 — температура газовой фазы. До начала истечения для реагирующего потока газа в стволе ДУ применялось уравнение для полной внутренней энергии газа $e_1(T_1, \mu_1)$ и уравнение химического равновесия $\mu_1(\rho_1, T_1)$ [10, 11]. Уравнение для внутренней энергии дисперсной фазы, имеющее вид $e_2 = e_2(T_2)$, где T_2 — температура дисперсной фазы, записывалось с учетом возможного фазового перехода (плавления частиц).

Полученная система уравнений замыкалась путем задания законов межфазового силового и теплового взаимодействия газовой и дисперсной фаз f_z , f_r , q . Численное интегрирование выполнено методом «крупных частиц» [8]. Разностная схема конструировалась с учетом проведения вычислений для стволов ДУ переменного сечения.

Необходимые для проведения вычислений параметры ДВ (скорость детонации, температура,

давление, плотность, скорость газа в точке Чемпена–Жуге и др.) рассчитывали для смеси с условной формулой $C_a H_b O_c N_d$ с добавлением инертных газов на основе уравнений баланса вещества, химического равновесия, газодинамики и уравнения состояния с использованием модели [12].

Для решения задачи оптимизации выбран один из представителей класса методов эволюционных вычислений — генетический алгоритм (ГА) [13, 14], применение которого позволяет создавать эффективные алгоритмы для широкого класса задач оптимизации [15]. При этом не требуется дополнительная информация о характере исследуемой функции, ее свойствах (дифференцируемость, непрерывность и др.), не накладываются ограничения на область поиска, которая может быть невыпуклой или многосвязной. Особенности других методов решения задач глобальной оптимизации, среди которых основными являются переборный и локально-градиентный подходы, не позволяют их использовать при оптимизации технологических режимов ДГНП. Переборный алгоритм наиболее прост в реализации, но для поиска оптимального решения необходимо проводить вычисления для всех возможных вариантов значений переменных, что для многопараметрических многоэкстремальных задач является нереальным. Градиентные методы работают быстро, но не гарантируют оптимальность найденного решения. Они идеальны для решения задач, где целевая функция имеет один экстремум. ГА превосходит в скорости и точности определения решения также и методы случайного поиска (метод Монте-Карло и др.), поскольку в процессе вычислений позволяет накапливать удачные решения.

Основная идея ГА заключается в коллективном поиске оптимума множеством независимых наборов значений (векторов) переменных, являющихся потенциальными решениями. На начальном этапе векторы переменных генерируются случайным образом. В дальнейшем каждое новое множество наборов значений переменных по определенным правилам формируется на основе предыдущего с учетом целевой функции. При этом в процессе итераций среднее по множеству значение целевой функции приближается к экстремуму. В ГА, как правило, используется терминология, заимствованная из биологии. Так, одна комбинация набора значений переменных представляет собой особь, множество особей на каждой итерации алгоритма в свою очередь представляют собой популяцию. Приспособленностью особи является количественная характеристика, показывающая, насколько успешно особь решает поставленную задачу, т. е. приспособленность представляет собой значение целевой функции для данного варианта набора переменных. Рассмотрим работу ГА на примере оптимизации ТП ДГНП более подробно.

В ГА векторы переменных кодируются в хромосому, которая является цепочкой символов, записываемой с использованием двух, трех или четырех букв алфавита. В версии алгоритма для определения оптимальных технологических параметров ДГНП использовался вариант бинарного кодирования, который является наиболее естест-

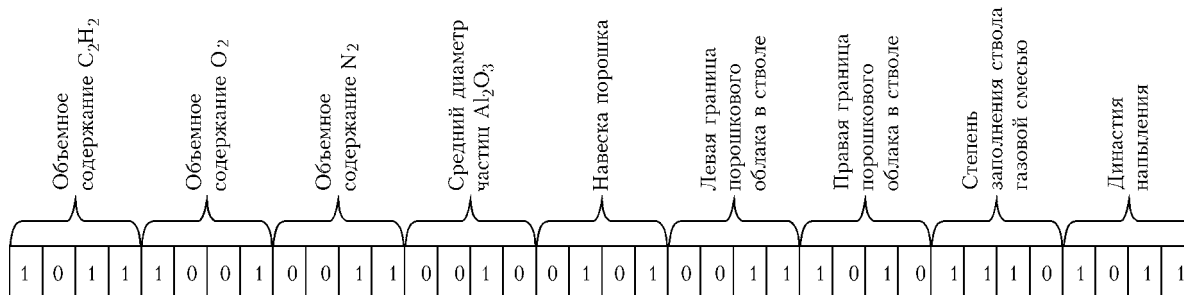


Рис. 2. Пример маски картирования хромосомы

венным при реализации алгоритма на ЭВМ, где вся информация представляет собой последовательность нулей и единиц. Кроме того, данная версия при тестировании алгоритма показала более быструю сходимость. Каждая переменная кодируется определенным фрагментом хромосомы, состоящим из фиксированного числа генов (разрядов). Рядом стоящие фрагменты никак не отделяются друг от друга, но при обратном декодировании хромосомы в вектор переменных на протяжении всего моделируемого периода используется одна и та же маска картирования. Размерность хромосомы определяется, исходя из количества параметров оптимизации и количества бит, необходимых для кодирования каждого параметра. При этом учитываются интервал возможных значений параметра $k_i[a_i, b_i]$ и точность его дискретного изменения ϵ_i . С учетом заданных условий количество бит t_i , необходимых для кодировки k_i , определяется из соотношения

$$t_i = \frac{\ln \left(\frac{b_i - a_i}{\epsilon_i} + 1 \right)}{\ln 2}.$$

На рис. 2 в качестве примера показано картирование хромосомы для наиболее часто применяемой в ДГНП газовой смеси ацетилена, кислорода и азота и порошка оксида алюминия.

В ГА прямая операция кодирования вектора переменных в хромосому не применяется. Хромосомы генерируются случайным образом, всякие последующие изменения в популяции затрагивают сначала генетический уровень, только после этого хромосомы декодируются и анализируются последствия этих изменений.

В процессе вычислений новая популяция получается путем воздействия на генотип родительских особей генетических операторов: кроссовера, мутации и инверсии, действие которых подробно описано в работе [14]. Оператор кроссовера для получения новой хромосомы производит обмен частями, на которые разбиваются две хромосомы-родители в любой точке. Оператор мутации произвольно изменяет состояние генов хромосомы на противоположное. Инверсия приводит к нарушению порядка следования генов в хромосоме потомка по сравнению с родительской хромосомой. Наиболее значим при поиске глобального экстремума оператор-кроссовер, поскольку он позволяет отбирать переменные, соответствующие наиболее удачному варианту решения для заданной целевой функции (неудачные варианты не будут включаться в новое поколение). Для глобального поиска

также предназначен оператор инверсии, тогда как мутация отождествляется со средствами локальной настройки решения.

В ГА предполагается, что количество особей от поколения к поколению остается неизменным. В этих условиях выбор родительских особей для получения новой популяции играет важную роль. Поэтому вероятность какой-либо особи текущей популяции стать родительской определяется пропорционально ее приспособленности.

При оптимизации процесса ДГНП приспособленность особей определялась следующим образом. На основе технологических параметров, полученных при декодировании хромосомы, моделируется движение двухфазного потока в стволе ДУ, его истечение в окружающую газовую среду и вычисляются средние значения скорости U_i и температуры T_i частиц на подложке. При наличии данных о средних значениях скорости и температуры частиц при взаимодействии с напыляемой поверхностью, особь удобно отображать в виде точки на пространстве критериев с осями U и T (рис. 3). Тогда приспособленность $\mu_i(t)$ особи A_i можно определить как расстояние, отделяющее параметры данной особи от оптимальных для получения заданного покрытия, а оптимальные значения соответственно скорости $U_{\text{опт}}$ и температуры $T_{\text{опт}}$ можно вычислить по формуле:

$$\mu_i(t) = \sqrt{(T_{\text{опт}} - T_i)^2 + (U_{\text{опт}} - U_i)^2} \rightarrow \min,$$

где t — номер поколения.

После определения приспособленности всех особей популяции вычисляется средняя приспособленность

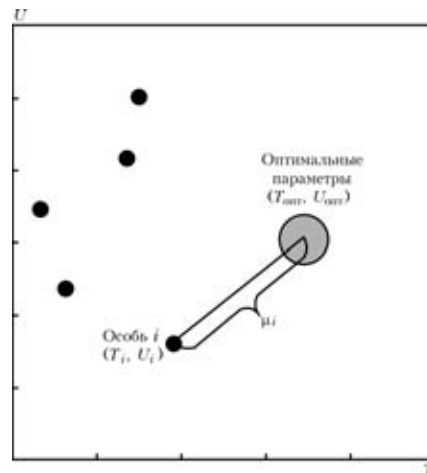


Рис. 3. Пространство критериев для задачи нахождения оптимальных технологических параметров ДГНП

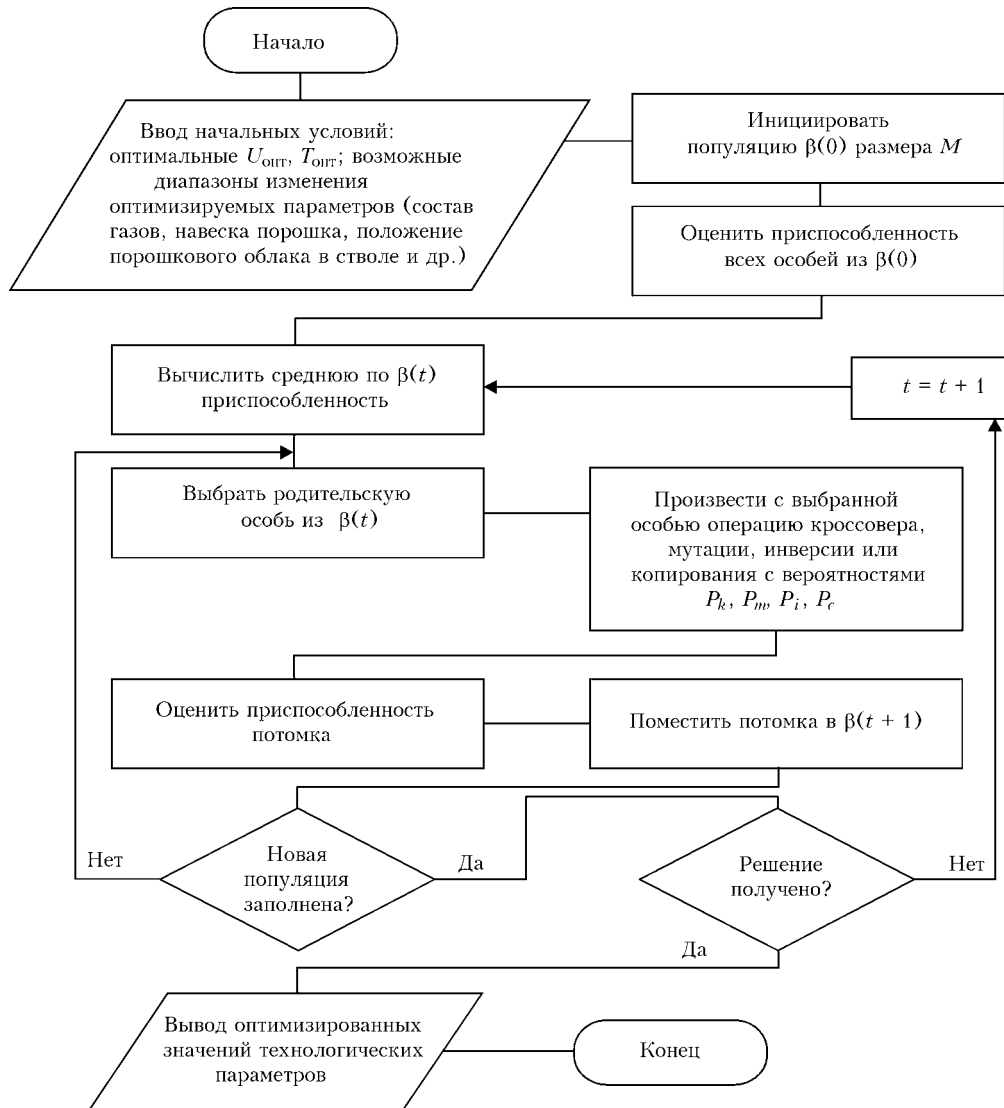


Рис. 4. Блок-схема работы генетического алгоритма

ленность по популяции $\hat{\mu}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(t) / M$, где M — количество особей в популяции. Среди особей, у которых отношение $\mu_i(t) / \hat{\mu}(t) < 1$, выбираются родительские особи с вероятностями, пропорциональными их приспособленности.

Алгоритм поиска оптимальных технологических параметров ДГНП представлен на рис. 4. Генетические операторы — кроссовер, инверсия, мутация и процедура копирования (при этом особь помещалась в следующее поколение без изменения) выбирали на каждом этапе случайным образом с вероятностями соответственно 0,75; 0,05; 0,15; 0,05. Работу ГА тестировали при поиске минимума функции Розенброка.

Для иллюстрации применения описанного алгоритма ниже представлены результаты численного эксперимента по определению оптимальных технологических параметров ДГНП для порошка оксида алюминия и газовой смеси ацетилена, кислорода и азота. Начальные условия следующие: ствол ДУ длиной 1,6 м и диаметром 0,024 м; объемная доля C_2H_2 выбиралась равной 1; объемная

доля O_2 — 1,0...2,5; объемная доля N_2 — 0...1; возможный диаметр частиц — 20...90 мкм; навеска порошка — 0,05...1,00 г; возможное положение левой границы порошкового облака — 0,8...1,2 м, правой — 1,1...1,6 м от закрытого конца ствола ДУ; дистанция напыления — 0,10...0,25 м. В качестве оптимальных параметров частиц выбраны скорость $U = 850$ м/с и температура $T = 2500$ К. Популяция состояла из 30 особей. Процесс поиска оптимальных технологических параметров показан на рис. 5.

Как видно из рис. 5, ГА довольно быстро сходится, и к 25-му поколению все особи группируются вокруг экстремума. При этом получены следующие параметры: газовая смесь $C_2H_2 + 1,7O_2 + 0,88 N_2$; диаметр частиц — 20 мкм; навеска порошка — 0,05 г; левая граница порошкового облака — 0,8 м от закрытого конца ствола ДУ, правая — 1,28 м; дистанция напыления — 0,1 м. Время расчета на ПК с процессором Pentium 4 составляло приблизительно 1 ч.

Таким образом, разработанное на основе генетического алгоритма программное обеспечение существенно упрощает проведение машинных экспе-

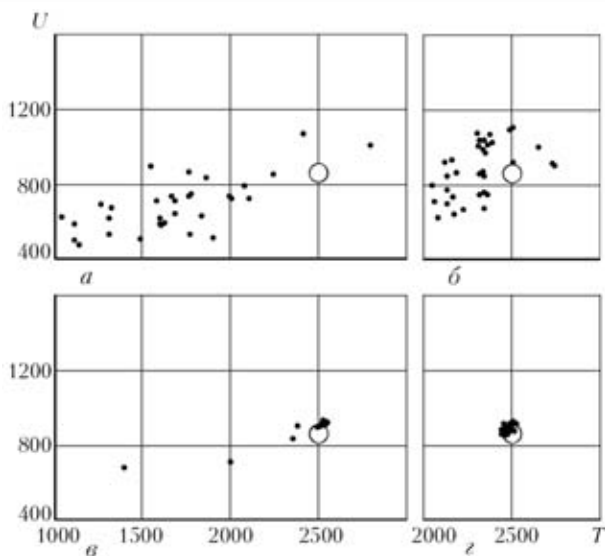


Рис. 5. Поиск оптимальных технологических параметров процесса ДГНП покрытий для частиц оксида алюминия: *a* – номер поколения $t = 0$; *b* – 4; \circ – 16; \bullet – 25

риментов по оптимизации технологических параметров ДГНП и уменьшает затраты времени. Это достигается полной автоматизацией процесса поиска оптимального решения, действия оператора сводятся только лишь к вводу начальных условий. В дальнейшем данная программа будет интегрирована в систему поддержки принятия решений по проектированию технологических процессов ДГНП.

1. *Бартенев С. С., Федько Ю. П., Григоров А. И.* Детонационные покрытия в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1982. – 215 с.
2. *Детонационное* нанесение покрытий на детали авиадвигателей и технологического оснащения с последующей магнитноабразивной обработкой / В. А. Богуслаев, А. И.

- Долматов, П. Д. Жеманюк и др. – Запорожье: Дека, 1996. – 364 с.
3. *Шоршоров М. Х., Харламов Ю. А.* Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
4. *Зверев А. И., Шаривкер С. Ю., Астахов Е. А.* Детонационное напыление покрытий. – Л.: Судостроение, 1979. – 232 с.
5. *Карамышева С. А., Прохоров Е. С.* Влияние формы и степени заполнения ствола взрывчатой смесью на параметры разгона частиц в установках детонационного напыления // Вопросы использования детонации в технологических процессах: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986. – С. 105–118.
6. *Lugscheider E., Papenfub-Janzen N.* Simulation of the influence of spray parameters on particle properties in APS // Proc. of the 2002 Intern. thermal spray conf. – Essen, 2002. – P. 42–46.
7. *Харламов М. Ю.* Динамика ускорения и нагрева порошка детонационно-газовой струей // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. праць. В 2 ч. Ч. 1. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2003. – С. 93–99.
8. *Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
9. *Нигматулин Р. И.* Основы механики гетерогенных сред. – М.: Наука, 1978. – 336 с.
10. *Ждан С. А., Феденюк В. И.* Параметры равновесного газового потока в стволе детонационной установки // Физика горения и взрыва. – 1982. – № 6. – С. 103–107.
11. *Николаев Ю. А.* Модель кинетики химических реакций при высоких температурах // Там же. – 1978. – № 4. – С. 73–76.
12. *Харламов М. Ю.* Вычисление состава продуктов и параметров детонации газовых смесей при напылении покрытий // Вісн. СХУ ім. В. Даля. – 2002. – № 11. – С. 254–262.
13. *Кружлов В. В., Борисов В. В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия–Телеком, 2002. – 382 с.
14. *Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности* / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. – Харьков: Основа, 1997. – 112 с.
15. *Батищев Д. И., Исаев С. А.* Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов // Высокие технологии в технике, медицине и образовании: Межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 1997. – С. 4–17.

A method is proposed to determine the optimum process parameters of detonation-gas spraying of coatings by the criterion of energy characteristics of the sprayed powder particles, which is based on the use of a genetic algorithm. Advantages of this approach are demonstrated compared to other methods of solving the optimization problems, and computer modeling is used to demonstrate its effectiveness.

Поступила в редакцию 26.04.2004,
в окончательном варианте 17.09.2004

ИСПЫТАТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ПОЛИМЕРОВ

(аттестат аккредитации в системе УкрСЕПРО № ИА 6.001.Т271 от 13.12.2001)

- испытания на прочность (в том числе термомеханические) полимерных и композитных материалов, а также их сварных соединений;
- морфологические исследования полимерных материалов и изделий из них;
- определение теплофизических характеристик полимерных материалов и изделий из них;
- проведение сертификационных испытаний в соответствии с требованиями аккредитации в системе УкрСЕПРО.

Оснащение: электронный микроскоп JEM-100 CX (фирма JEOL, Япония); световой поляризационный микроскоп «Versamet-2»; стенд для гидравлических испытаний ИТР; разрывные машины; маятниковые копры; приборы для определения теплофизических характеристик.

ИЭС им. Е. О. Патона, отд. № 80
Тел./факс: (38044) 227 46 88
E-mail: korab@paton.kiev.ua