

УДК 65.018

В.Ю. Столбов, М.Б. Гитман, С.А. Федосеев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Рассматривается общая математическая постановка задачи управления качеством продукции на всем протяжении ее жизненного цикла. Считается, что процесс формирования качества продукции зависит от совокупности процессов: планирования, изготовления, сбыта, обслуживания и т.д. Вводятся функционалы качества продукции, на основании которых строятся как критерии оптимальности, так и ограничения в задаче управления. Предлагаются способы построения функционалов качества при описании различных процессов. Приводится пример управления качеством продукции на двух последовательных этапах изготовления.

Ключевые слова: управление качеством, бизнес-процесс, функционалы качества, задача оптимального управления качеством, качество продукции промышленного предприятия.

V.Iu. Stolbov, M.B. Gitman, S.A. Fedoseev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MANAGEMENT OF PRODUCTS QUALITY FORMATION PROCESS AT THE INDUSTRIAL ENTERPRISE

The general mathematical formulation of the products quality management problem throughout products life cycle is considered. It is believed that the product quality formation process depends on a combination of processes: planning, manufacturing, sales, service, etc. Quality products functionals are formulated. On the basis of these functionals the optimality criteria and constraints in a control problem are constructed. Ways to build quality functionals in the description of the various processes are proposed. An example of product quality control at two consecutive stages of manufacture is given.

Keywords: quality management, business process, quality functional, optimal quality management, quality of industrial enterprise.

Введение

Современное определение качества продукции имеет сложную структуру и включает не только отсутствие дефектов и наличие максимального количества полезных для потребителя свойств, но и минимальную стоимость, и максимальную своевременность поставки, и высокую технологичность обслуживания и ремонта. Кроме того, современное понятие качества продукции, на наш взгляд, должно учитывать

и интересы производителя: высокую технологичность изготовления, низкую себестоимость, значительную прибыль от ее реализации, хорошую организацию производства и т.п. Однако часто интересы производителя и потребителя продукции являются антагонистическими, описываются многими критериями оптимальности, а производственные процессы протекают при внешних возмущениях различной природы, что обуславливает необходимость постановки и решения задачи оптимального управления качеством продукции в условиях неопределенности.

Общим проблемам управления качеством посвящены работы У. Тейлора, У. Шухарта, У. Деминга, А. Фейгенбаума, Дж. Джурана, Ф. Кросби, Г. Тагути, К. Исикавы, В.А. Лapidуса, И.И. Мазура, В.Д. Шапира, Ю.П. Адлера, Г.С. Гуна, Л.А. Кузнецова и других авторов [1–13]. Однако в этих работах в основном приводятся методы квалитметрии и механизмы управления качеством выпускаемой продукции, но не рассматривается общая постановка задачи управления как задачи оптимального управления процессом формирования качества продукции.

Предметом исследования настоящей работы является рассмотрение понятия качества продукции как объекта управления. Под объектом управления будем понимать управляемую систему, воспринимающую управляющие воздействия со стороны органа управления (управляющей системы). В работе [14] рассмотрен принцип отражения, согласно которому «качество процесса переносится (отражается) на качество результата». В соответствии с данным принципом, рассматривая качество как объект управления, можно перейти к рассмотрению управления взаимосвязанными процессами, участвующими в формировании качества продукции на протяжении всего ее жизненного цикла. Тогда качество как объект управления представляет собой результат системы взаимосвязанных процессов, участвующих в формировании качества продукции на протяжении всего ее жизненного цикла. К этим процессам можно отнести процессы прогнозирования, планирования, производства, сбыта, обслуживания и т.п. При этом следует отметить, что все вышеуказанные процессы, в свою очередь, могут быть разбиты на подпроцессы и/или этапы жизненного цикла продукции. Пример такого разбиения приведен, например, в работе [15]. Под управлением качеством продукции будем понимать

постоянный, планомерный, целеустремленный процесс воздействия на всех стадиях, обеспечивающих создание продукции и полноценное ее использование.

Следует отметить, что качество продукции как объект управления характеризуется соответствующими показателями (проектными, производственными, эксплуатационными и прогнозируемыми) и вероятными отклонениями от этих показателей. Необходимо не только уметь оценивать эти отклонения, но и располагать возможностями, необходимыми для воздействия на процессы жизненного цикла продукции, для устранения вероятных отклонений показателей ее качества. Ухудшение показателей качества может происходить вследствие физического износа продукции, изменения ее внутренней структуры или состояния в процессе эксплуатации, морального старения продукции и т.п. Качество продукции может отклоняться от заданных параметров под влиянием производственных причин и всегда зависит от совершенства технологии, качества поступающих материалов, состояния оборудования, приспособлений и инструмента, мотивации персонала и других переменных внутренней и внешней среды предприятия. Другими словами, качество продукции может изменяться в каждый момент времени ее жизненного цикла и зависит от параметров различных процессов, взаимодействующих и взаимовлияющих друг на друга. При этом процессы, протекающие во времени и влияющие на качество продукции, могут обладать короткой или длительной памятью, которую необходимо учитывать при описании качества продукции как объекта управления.

Таким образом, качество продукции, характеризующееся широким спектром показателей, изменяющихся во времени, формируется системой взаимосвязанных процессов жизненного цикла продукции, которые в общем случае являются многопараметрическими и нелинейными, обладают памятью и часто реализуются в условиях различной неопределенности. Из этого следует, что качество продукции представляет собой сложный объект управления, требующий разработки эффективных механизмов воздействия на все процессы, его формирующие, т.е. построения целостной системы управления качеством продукции.

1. Качество продукции как функционал процессов, протекающих на всех этапах жизненного цикла

Введем вектор-функцию качества продукции

$$\overline{K} = \overline{K}(t), \quad t_0 \leq t \leq T, \quad (1)$$

где \overline{K} – некоторая вектор-функция, определяющая всю совокупность заданных показателей качества продукции, значения которых изменяются во времени и зависят от всей предыстории процесса формирования качества продукции; T – время жизненного цикла продукции.

Как уже отмечалось, процесс формирования качества продукции зависит от совокупности других процессов $\overline{\Pi}(\tau)$ (планирования, изготовления, сбыта, обслуживания и т.д.), определяющих заданные показатели качества продукции в рассматриваемый период времени.

Тогда в момент времени $\tau = t$ значение качества продукции $\overline{K}(t)$ можно определить как функционал процессов $\overline{\Pi}(\tau)$ в виде

$$\overline{K}(t) = \overline{F} [t; \overline{\Pi}(\tau), \quad t_0 \leq \tau \leq t]. \quad (2)$$

Построение конкретных видов функционалов \overline{F} для различных видов продукции представляет собой сложную проблему квалиметрии качества продукции, поэтому на практике пытаются упростить эту задачу различными способами. Например, в качестве основных берут только функциональные показатели продукции $\overline{K}_f(t)$, а в качестве процессов, определяющих качество продукции, рассматривают только технологические процессы $\overline{\Pi}_p(\tau)$. В этом случае

$$\overline{K}_f(t) = \overline{F}_p [t; \overline{\Pi}_p(\tau), \quad t_0 \leq \tau \leq t]. \quad (3)$$

Подобный подход обычно называется технологическим. При этом вместо функционала (3) устанавливаются функциональные отношения между комплексными показателями качества и параметрами технологических процессов [12, 13].

Аналогично можно ввести группу социально-экономических показателей качества продукции $\overline{K}_{es}(t)$, определяемых процессами организации производства и сбыта продукции $\overline{\Pi}_o(\tau)$ [16, 17]:

$$\overline{K_{es}}(t) = \overline{F}_o [t; \overline{\Pi}_o(\tau), t_0 \leq \tau \leq t]. \quad (4)$$

Следует отметить, что в простейшем случае значение вектора показателей качества (2) в момент времени t является просто аналитической функцией параметров процесса в этот же момент времени. Тогда можно записать

$$\overline{K}(t) = \overline{f} (\overline{\Pi}(t)). \quad (5)$$

Примером такого подхода может быть прочность материала в некоторый момент времени, которая определяется только его химическим составом в этот момент времени.

Если значение показателей качества определяется не только показателями процессов, но и скоростью изменения показателей этих процессов, то при условии дифференцируемости показателей процесса можно аналогично работе [18] функционал качества представить в виде универсальной функции от всех производных показателей процессов по t :

$$\overline{K}(t) = \overline{F} [t; \overline{\Pi}(\tau), t_0 \leq \tau \leq t] = \overline{\Phi} (\overline{\Pi}(t), \frac{d\overline{\Pi}}{dt}(t), \frac{d^2\overline{\Pi}}{dt^2}(t), \dots). \quad (6)$$

Следует отметить, что функционал качества можно аппроксимировать функцией некоторого конечного числа производных.

Примером в этом случае может быть твердость поверхности, которая определяется не только температурой закалки, но и скоростью охлаждения.

В случаях, когда качество продукции зависит не от всего времени ее изготовления, а только от небольшого отрезка рассматриваемого интервала времени, то функционал качества можно записать в виде

$$\overline{K}(t) = \int_{t_0}^t B(t, \tau) \overline{\Pi}(\tau) d\tau, \quad (7)$$

где $B(t, \tau)$ – некоторая универсальная функция памяти (ядро функционала) для всех показателей качества. Если для каждого показателя качества своя функция памяти, то функционал качества (7) может быть представлен суммой многократных интегралов.

В этом случае в качестве примера можно рассмотреть уровень остаточных напряжений в изделии, который определяется не всей ис-

торией процесса, а только последней операцией пластического деформирования.

Отметим, что практически во всех случаях функционал (2) можно рассматривать как предел функции многих переменных. При этом интервал $t - t_0$ разбивается на n равных отрезков $\Delta\tau = \tau_{k+1} - \tau_k$ ($k = 0, 1, \dots, n - 1$), $\tau_0 = t_0$, $\tau_n = t$, и берется набор значений показателей процессов, формирующих качество продукции:

$$\overline{\Pi}_k = \overline{\Pi(\tau_k)}.$$

Далее рассматривается функция качества n переменных:

$$\overline{K}_n = \overline{J} (\overline{\Pi}_1, \overline{\Pi}_2, \dots, \overline{\Pi}_n). \quad (8)$$

Известно, что для функционала вида (2) всегда найдется такая функция n переменных (8), что существует предел

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \overline{K}_n = \overline{F} [t; \overline{\Pi(\tau)}, t_0 \leq \tau \leq t]. \quad (9)$$

При этом функция (8) при некотором n может быть аппроксимирующей для функционала (2).

Построение конкретных видов функционалов (2) для различных видов продукции и технологических процессов их изготовления является одной из фундаментальных проблем современной теории квалиметрии и качества. Частично данные вопросы решены в работах [12–14, 16].

2. Общая математическая постановка задачи управления качеством продукции

Как было отмечено выше, управление качеством продукции представляет собой постоянный, планомерный, целеустремленный процесс воздействия на всех стадиях жизненного цикла продукции (бизнес-процесс), обеспечивающих создание продукции и полноценное ее использование в условиях имеющихся ограничений.

Перейдем к математической постановке задачи управления качеством продукции.

Будем считать, что жизненный цикл некоторой продукции задается отрезком времени $[t_0, T]$. При этом интегрированный бизнес-процесс включает N последовательных процессов. Тогда $[t_0, T] = \cup [t_{i-1}, t_i]$, $i = 1, \dots, N$.

Все параметры, отвечающие за качество бизнес-процесса (всех входящих в него процессов), можно разбить на два множества: множество параметров состояния $x(\cdot)$ ($x(\cdot) = (x_1(\cdot), x_2(\cdot), \dots, x_N(\cdot))$), в качестве которых выступает n -мерная вектор-функция из пространства кусочно-гладких функций $KC^1([t_0, T], R^n)$, где R^n – n -мерное евклидово пространство (обычно $n > N$), и множество параметров управления $u(\cdot)$, в качестве которых выступает r -мерная вектор-функция из пространства кусочно-непрерывных функций $KC([t_0, T], R^r)$, где R^r – r -мерное евклидово пространство. При этом вследствие существующей неопределенности будем считать, что в общем случае параметры состояния представляют собой случайные величины (изменение по времени этих параметров суть случайный процесс), поэтому для любого момента времени параметр состояния можно рассматривать как сумму $x(\cdot)$ и некоторого возмущения $y(\cdot)$, где $y(\cdot)$ принадлежит пространству $KC^1([t_0, T], R^n)$. В том случае, когда возмущения $y(\cdot)$ являются несущественными, т.е. $|y(t)| \leq \varepsilon$, $t \in [t_0, T]$, ε – некоторое заданное малое положительное число, то в качестве $x(t)$ будем понимать или само значение $x(t)$, или его усредненное значение по каждому процессу, входящему в бизнес-процесс. Другими словами, в рамках каждого рассматриваемого процесса определяется математическое ожидание $x(t)$, т.е. строится M -модель [19]. Если при некотором процессе в некоторый момент времени возмущение превышает наперед заданное значение ε , то под $x(t)$ будем понимать значение данного параметра состояния $x(t)$ при фиксированном возмущении, в качестве которого обычно выбирают наиболее неблагоприятное значение с точки зрения выбранного критерия оптимальности данного процесса. В последнем случае строится (аналогично критерию Вальда) MM -модель процесса [19], позволяющая исключить неопределенность по возмущениям.

Отметим, что в том случае, когда количество показателей качества продукции в функции (1) велико, могут применяться различные операции их агрегирования [12–16, 19], поэтому введем Ξ – некоторый оператор агрегирования показателей качества:

$$K(t) = \Xi(\bar{K}(t)).$$

Отметим, что при построении оператора агрегирования можно пойти различными путями. В частности, можно строить *иерархический* показатель, в котором главными критериями будут эксплуатационные

показатели продукции, или показатели качества с точки зрения производителя. Однако можно и не вводить такую дифференциацию, а учитывать все введенные показатели качества продукции как равноправные. Например, можно управлять параметрами бизнес-процесса при получении продукции, соответствующей принятой норме качества с заданной вероятностью при минимальных экономических издержках. При этом сам вид оператора агрегирования может быть различным. В частности, это может быть некоторая статистика, нечеткое множество, вероятностная мера, свертка, некоторая обобщенная функция и т.п.

Будем считать, что качество продукции в некоторый момент времени t определяется качеством бизнес-процесса, т.е. совокупностью значений параметров состояния и управления всех процессов за весь период времени $t_0 \leq \tau \leq t$. Тогда можно записать:

$$K(t) = F(t, x(\tau), u(\tau), \tau \in [t_0, t]),$$

где F – некоторый заданный функционал качества, зависящий от исследуемого бизнес-процесса.

Для построения критерия оптимальности задачи управления качеством введем некоторый функционал $J_0(t_i, x(\cdot), u(\cdot))$, экстремум которого и будет определять оптимальное качество продукции.

Например, при необходимости получения заданных параметров качества K^* в момент времени t_i критерий оптимальности может быть записан в виде невязки, которую необходимо минимизировать, т.е.

$$J_0(t_i, x(\cdot), u(\cdot)) = (K(t_i) - K^*)^2 \rightarrow \min .$$

Если необходимо максимизировать обобщенный показатель качества в заданный момент времени, то

$$J_0(t_i, x(\cdot), u(\cdot)) = \Xi(\bar{K}(t_i)) \rightarrow \max .$$

В качестве ограничений задачи управления могут выступать различные функциональные ограничения в виде равенств и неравенств (на ресурсы, на технологии, на качество материалов и т.п.), дифференциальные связи между параметрами состояния и параметрами управления, а также ограничения на сами параметры состояния и управления. При этом ограничения также могут быть жесткими и нежесткими, в последнем случае они могут быть записаны в вероятностном виде, нечетком виде и т.п.

Теперь общая постановка задачи управления качеством продукции может быть представлена следующим образом: найти такой управляемый процесс

$$(\hat{t}_i, \hat{x}_i(\cdot), \hat{u}_i(\cdot)) \in R^{N \times} KC^1([t_0, T], R^n) \times KC([t_0, T], R^r), i = 1, \dots, N,$$

при котором

$$J_0(t_i, x(\cdot), u(\cdot)) \rightarrow \text{extr} \quad (10)$$

при ограничениях, в качестве которых выступают:

а) соотношения между показателями качества продукции и параметрами бизнес-процесса:

$$K(t) = F(t, x(\tau), u(\tau), \tau \in [t_0, t]); \quad (11)$$

б) соотношение между параметрами состояния и параметрами управления процессами (дифференциальные связи):

$$\varphi_i(t, x_i(t), \dot{x}_i(t), u_i(t)) = 0, t \in [t_{i-1}, t_i], i = 1, \dots, N, \quad (12)$$

где φ_i – заданные вектор-функции для каждого процесса;

в) краевые условия:

$$x(t_i) = \bar{x}_i, i = 1, \dots, N; \quad (13)$$

г) функциональные ограничения на ресурсы:

$$J_j(t_i, x_i(\cdot), u_i(\cdot)) = \alpha_j, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, m', \quad (14)$$

$$J_j(t_i, x_i(\cdot), u_i(\cdot)) \leq 0, i = 1, \dots, N, j = m'+1, \dots, m; \quad (15)$$

д) ограничения на параметры состояния и управления:

$$x_i(t) \in X_i(t), t \in [t_{i-1}, t_i], i = 1, \dots, N, \quad (16)$$

$$u_i(t) \in U_i(t), t \in [t_{i-1}, t_i], i = 1, \dots, N, \quad (17)$$

где N – общее количество процессов, составляющее интегрированный бизнес-процесс; m – общее количество различных функциональных ограничений в виде равенств и неравенств; $x_i(t)$, $u_i(t)$ – заданные множества значений параметров состояния и управления соответственно.

Отметим, что задача оптимального управления качеством (10)–(17) при некоторых видах функционала $J_0(t_i, x(\cdot), u(\cdot))$ может быть отнесена к классической теории оптимального управления [20].

Следует подчеркнуть, что для постановки и решения конкретной задачи управления качеством продукции необходимо описать соответствующий бизнес-процесс, провести необходимое (возможное) агрегирование показателей качества и построить функционалы процессов, совокупность которых и определяет качество продукции.

3. Демонстрационный пример

В качестве примера рассмотрим бизнес-процесс производства крепежных деталей осесимметричной формы, широко применяемых в машиностроении. При этом рассмотрим только технологический подход, связывающий качество продукции с параметрами технологических процессов изготовления. В рассматриваемом случае основным технологическим процессом является электровысадка, позволяющая получать заготовки по безотходной технологии и с большой производительностью. При этом электровысадка в основном определяет качество изготавливаемых крепежных деталей, связанное с их прочностью и долговечностью.

Электровысадка состоит из двух последовательных этапов (рис. 1): нагрева заготовки путем пропускания через нее электрического тока и деформирования нагретой цилиндрической заготовки до получения детали требуемой формы.

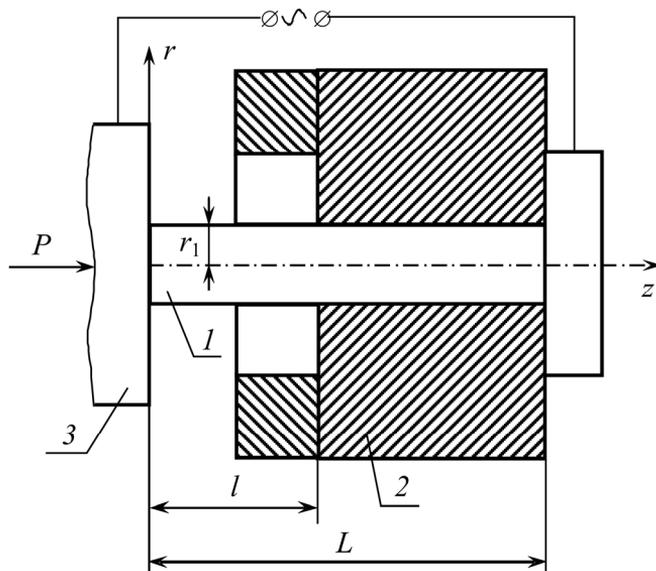


Рис. 1. Схема процесса электровысадки детали:
 1 – заготовка; 2 – матрица; 3 – пуансон

Как показывают эксперименты [21], предельная пластичность металла заготовки зависит от многих параметров, основными из которых являются температура θ , интенсивность скоростей деформаций H и напряженное состояние, характеризующееся показателем σ/T (σ – среднее напряжение, T – интенсивность касательных напряжений), поэтому при неправильно выбранных режимах электровысадки происходит разрушение металла или возникают микротрещины, что существенно снижает качество продукции.

В связи с этим необходимо выбрать такие режимы процесса (функцию распределения тока по времени, время нагрева и давление на пуансон), при которых деформирование заготовки будет происходить при максимально допустимом использовании пластичности металла.

Решение этой проблемы удобно разделить на две оптимальные задачи, связанные между собой. Вначале оптимизируется процесс нагрева заготовки, чтобы в конце нагрева получить распределение температуры, близкое к оптимальному, при котором предельная пластичность металла близка к максимальному значению. Затем, управляя давлением на пуансон и зная температуру нагрева заготовки, следует постараться приблизиться по некоторой норме к оптимальному напряженному состоянию.

Перейдем к постановке задачи управления процессом формирования качества, т.е. процесса электровысадки.

Время процесса разделим на два отрезка: $[0, t_1]$, где t_1 – время нагрева заготовки, и $[t_1, t_2]$, где $(t_2 - t_1)$ – время деформирования.

В качестве управлений выберем функцию силы тока $I_0(t)$, $t \in [0, t_1]$ и функцию скорости изменения давления на пуансоне $\dot{P}(t)$, $t \in [t_1, t_2]$.

Теперь задача оптимального управления может быть сформулирована следующим образом. Найти такие управления из класса кусочно-непрерывных функций $u_1(\cdot) = I_0(t)$, $t \in [0, t_1]$ и $u_2(\cdot) = \dot{P}(t)$, $t \in [t_1, t_2]$, а также параметры $x(\cdot)$, характеризующие термоупругопластическое состояние материала в процессе нагрева и деформирования, которые сообщают минимальные значения следующим функционалам:

$$J_{10}(t_1, x(\cdot), u(\cdot)) = \int_0^{t_1} [\theta(t_1, r_1, z, x, u_1) - \bar{\theta}(x, H, \sigma/T)]^2 dz \Rightarrow \inf \quad (18)$$

и

$$J_{20}(t_2, x(\cdot), u(\cdot)) = \int_{t_1}^{t_2} [\max(H(t, r, u_2) - \bar{H}(\theta, \sigma / T)]^2 dt \Rightarrow \inf \quad (19)$$

при ограничениях типа равенств, представляющих собой операторные уравнения краевых задач электротеплопроводности и термоупругопластичности:

$$\varphi_1(t, x(t), \dot{x}(t), u_1(t)) = 0, t \in [0, t_1], \quad (20)$$

$$\varphi_2(t, x(t), \dot{x}(t), u_2(t)) = 0, t \in [t_1, t_2] \quad (21)$$

и неравенств

$$0 \leq u_1(t) \leq \bar{I}, t \in [0, t_1], \quad (22)$$

$$0 \leq u_2(t) \leq \bar{P}, t \in [t_1, t_2]. \quad (23)$$

Здесь $\bar{\theta}$ и \bar{H} – заданные значения температуры и скорости деформации, которые соответствуют максимальной пластичности материала и берутся из эксперимента; \bar{I} и \bar{P} – максимально допустимые значения величины тока и скорости изменения усилия пуансона, соответствующие возможностям технологического оборудования. При этом $\bar{\theta} = \bar{\theta}_1$ (берется из эксперимента) при $z \in [0, l]$ и $\bar{\theta} = \bar{\theta}_2 = 50^\circ\text{C}$ при $z \in (l, L)$.

Необходимо отметить, что задача (18)–(23) является частным случаем поставленной выше задачи (10)–(17). Кроме того, задачу (18)–(23) можно разделить на последовательность двух задач управления, связанных между собой. Первая – это задача электронагрева [формулы (18), (20), (22)], а вторая – задача деформирования [формулы (19), (21), (23)]. При решении первой задачи необходимо знать распределение интенсивности скоростей деформаций по объему заготовки, от которого зависит температура $\bar{\theta}$ и которое определяется во второй задаче. Для решения второй задачи необходимо знать распределение температур по объему в момент времени t_1 . В связи с этим была разработана специальная методика построения минимизирующих последовательностей, позволяющая решать связанные задачи минимизации [22].

Как показало численное решение задачи электропроводности, изменение температуры по радиусу заготовки незначительно, и им можно пренебречь. В этом случае задача теплопроводности (20) сводится к одномерной, решение которой можно получить аналитическим

способом с помощью метода Фурье. В работе [22] показано, что управление $u_1(\cdot) = I_0(t)$, $t \in [0, t_1]$, доставляющее минимум функционалу (18) при заданной функции $\bar{\theta}$, должно быть релейно, или, другими словами, существует и единственно только в классе ступенчатых функций на отрезке $[0, t_1]$. Этим свойством обладает прерывистая периодическая функция, которая удовлетворяет требованию простоты реализации в реальном технологическом процессе. Тогда исходная задача управления (18), (20), (22) сводится к задаче нелинейного программирования путем выбора за параметры оптимизации величины тока в период нагрева и отношения времени нагрева и времени паузы. Пример решения данной задачи (при $l = 20$ мм, $L = 50$ мм) приведен на рис. 2, из которого видно, что режим прерывистого нагрева (график 2 на рис. 2, а) дает распределение температуры по поверхности заготовки (график 2 на рис. 2, б) более благоприятное с точки зрения близости к заданной температуре $\bar{\theta}$, чем существующий режим нагрева.

Теперь рассмотрим решение второй оптимальной задачи (19), (21), (23). Исходя из анализа вида распределения температуры по длине заготовки, можно предположить, что деформированием холодной части ($z > l$) можно пренебречь и рассматривать только деформирование высаживаемой части. При этом считается, что в качестве материала модели может

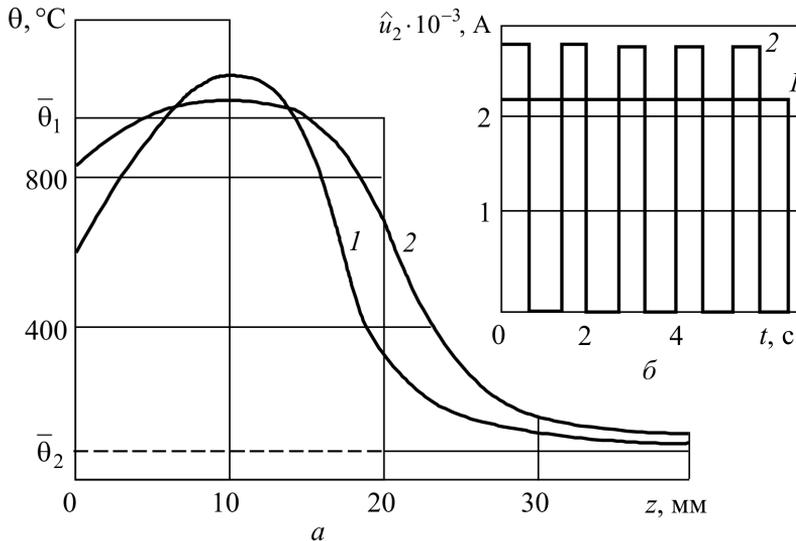


Рис. 2. Решение задачи управления процессом электронагрева:
 а – режим нагрева (1 – существующий; 2 – оптимальный);
 б – распределение температуры по поверхности заготовки
 (1 – при существующем режиме нагрева; 2 – при оптимальном режиме нагрева)

быть принята модель несжимаемой линейно-вязкой среды. Тогда, как показано в работе [22], задача оптимального управления (19), (21), (23) может быть решена с помощью принципа максимума Понтрягина [20]. Пример качественного решения задачи управления показан на рис. 3, из которого следует, что функция управления $u_2(\cdot) = \dot{P}(t)$, $t \in [t_1, t_2]$ должна иметь переключение (см. рис. 3, а) в некоторой точке τ , зависящей от температуры нагрева заготовки и механических свойств ее материала. В этом случае интенсивность скоростей деформаций на протяжении всего процесса деформирования наиболее близка к заданной \bar{H} (см. рис. 3, б), что снижает возможность разрушения металла при высадке.

На рис. 4 показано изменение в процессе деформирования истощения максимального ресурса пластичности ψ , выбранного в качестве критерия разрушения металла [21]. Видно, что при существующем режиме электровысадки (кривая 1 на рис. 4) происходит разрушение материала ($\psi > 1$). Оптимальный режим деформирования при существующем режиме нагрева (кривая 2) позволяет снизить вероятность разрушения. Еще ниже эта вероятность при существующем режиме деформирования и оптимальном режиме нагрева (кривая 3). Наилучшие результаты достигаются при использовании оптимальных режимов

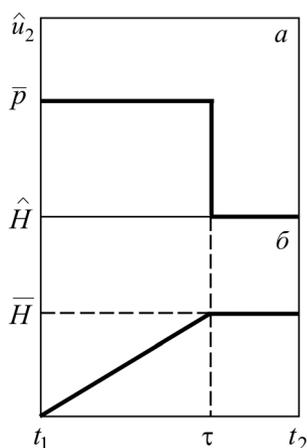


Рис. 3. Качественное решение задачи управления процессом высадки при различных режимах: а – оптимальная функция управления; б – распределение максимальной скорости деформации

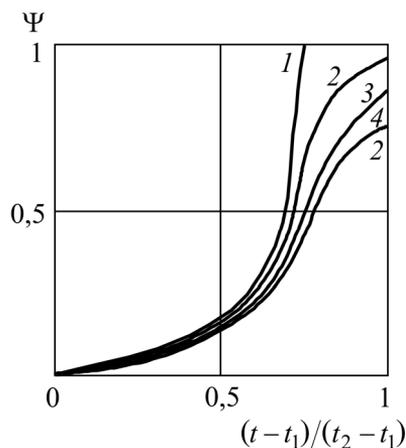


Рис. 4. Истощение ресурса пластичности металла

нагрева и деформирования совместно (кривая 4). В последнем случае можно говорить о значительном повышении качества продукции за счет существенного снижения истощения ресурса пластичности материала в процессе изготовления.

Заключение

Приводится общая математическая модель управления качеством продукции на всем протяжении ее жизненного цикла. Отмечается, что процесс формирования качества продукции зависит от совокупности других процессов (планирования, изготовления, сбыта, обслуживания и т.д.).

Предлагаемый подход к описанию качества продукции как объекта управления позволяет систематизировать методы управления качеством для конкретных видов функционалов качества. Например, в случае, когда показатели качества продукции представляются аналитическими функциями параметров процесса, удобно использовать теорию оптимизации функции многих переменных, если функционалами, то может быть использован математический аппарат теории вариационного исчисления или оптимального управления.

Рассмотрена задача управления процессом изготовления крепежных деталей осесимметричной формы, представляющая пример технологического подхода при управлении качеством продукции. Показано, что качество заготовки в данном случае определяется двумя процессами, связанными между собой. Это обуславливает необходимость постановки и решения связанных задач оптимального управления на заданном отрезке времени всего процесса формирования качества продукции.

Примеры управления качеством продукции на этапе планирования производства в рамках организационного подхода приведены, например, в работах [17, 23].

Следует отметить, что дальнейшее развитие предлагаемой методики подразумевает необходимость решения задачи управления всем процессом формирования качества на всем жизненном цикле продукции с использованием совместно как организационного, так и технологического подходов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации Постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. Тейлор Ф.У. Принципы научного менеджмента: пер. с англ. – М., 1991. – 104 с.
2. Уиллер Д., Чамберс Д. Статистическое управление процессами. Оптимизация бизнеса с использованием контрольных карт Шухарта. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2009. – 310 с.
3. Деминг Э. Выход из кризиса: новая парадигма управления людьми, системами и процессами. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2008. – 419 с.
4. Фейгенбаум А. Контроль качества продукции. – М.: Экономика, 1986. – 471 с.
5. Джуран Дж. Качество в истории цивилизации. Эволюция, тенденции и перспективы управления качеством: в 3 т. – М.: Стандарты и качество, 2004.
6. Кросби Ф. Качество и я. Жизнь бизнеса в Америке. – М.: Стандарты и качество, 2003. – 264 с.
7. Управление качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути / Р. Леон, А. Шумейкер, Р. Какар [и др.]. – М.: СЕЙФИ, 2002. – 384 с.
8. Исикава К. Японские методы управления качеством: пер. с англ. – М.: Экономика, 1988. – 215 с.
9. Лapidус В.А. Всеобщее качество (TQM) в российских компаниях. – М., 2000. – 432 с.
10. Мазур И.И., Шапиро В.Д. Управление качеством. – М.: Омега-Л, 2008. – 399 с.
11. Адлер Ю.П., Щепетова С.Е. Система экономики качества. – М.: Стандарты и качество, 2005. – 184 с.
12. Управление качеством продукции в технологиях метизного производства / А.Г. Корчунов, М.В. Чукин, Г.С. Гун, М.А. Полякова. – М.: Руда и металлы, 2012. – 164 с.
13. Кузнецов Л.А. Современный подход к управлению металлургической технологией // Производство проката. – 1999. – № 9. – С. 27–34.
14. Субетто А.И. Сочинения. Ноосферизм: в 13 т. Т. 8. Квалитативизм: философия и теория качества, квалитология, качество жизни, качество человека и качество образования / под ред. Л.А. Зеленова / Костром. гос. ун-т. – Кострома, 2009. – 392 с.
15. Бочкарев С.В., Петраченков А.Б. Управление качеством: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2008. – 347 с.

16. Управление качеством продукции на современных промышленных предприятиях: монография / С.А. Федосеев, М.Б. Гитман, В.Ю. Столбов, А.В. Вожаков. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 229 с.

17. Гитман М.Б., Столбов В.Ю., Федосеев С.А. Организационный подход к управлению качеством продукции // Стандарты и качество. – 2012. – № 5. – С. 80–84.

18. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. – М.: Изд-во МГУ, 1978. – 287 с.

19. Гитман М.Б. Введение в стохастическую оптимизацию. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 104 с.

20. Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В. Оптимальное управление. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2005. – 384 с.

21. Колмогоров В.Л. Напряжения. Деформации. Разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 232 с.

22. Столбов В.Ю., Трусов П.В. Связанные задачи оптимизации процессов упругопластического деформирования металлов // Прикладная математики и механика. – 1999. – Т. 63, № 4. – С. 687–695.

23. Федосеев С.А., Гитман М.Б., Столбов В.Ю. Математические модели управления качеством продукции на этапе планирования производства // Проблемы управления. – 2011. – № 4. – С. 60–67.

References

1. Teilor F.U. Printsipy nauchnogo menedzhmenta [Principles of scientific management]. Moscow, 1991. 104 p.

2. Uiller D., Chambers D. Statisticheskoe upravlenie protsessami. Optimizatsiia biznesa s ispol'zovaniem kontrol'nykh kart Shukharta [Statistical process control. Business optimization using Shewhart control charts]. Moscow: Al'pina Biznes Buks, 2009. 310 p.

3. Deming E. Vykhod iz krizisa: novaia paradigma upravleniia liud'mi, sistemami i protsessami [Recovering from the crisis: a new paradigm of managing people, systems and processes]. Moscow: Al'pina Biznes Buks, 2008. 419 p.

4. Feigenbaum A. Kontrol' kachestva produktsii [Quality control]. M.: Ekonomika, 1986. 471 p.

5. Dzhuran Dzh. Kachestvo v istorii tsivilizatsii. Evoliutsiia, tendentsii i perspektivy upravleniia kachestvom [Quality in the history of civilization.

Evolution, trends and prospects of the quality management]. Moscow: Standarty i kachestvo, 2004.

6. Krosbi F. Kachestvo i ia. Zhizn' biznesa v Amerike [Quality and me. Business life in America]. Moscow: Standarty i kachestvo, 2003. 264 p.

7. Leon R., Shumeiker A., Kakar R. [et al.]. Upravlenie kachestvom. Robastnoe proektirovanie. Metod Taguti [Quality control. Robust design. Taguchi method]. Moscow: SEIFI, 2002. 384 p.

8. Isikava K. Iaponskie metody upravleniia kachestvom [Japanese quality management]. Moscow: Ekonomika, 1988. 215 p.

9. Lapidus V.A. Vseobshchee kachestvo (TQM) v rossiiskikh kompaniiakh [General quality (TQM) in Russian companies]. Moscow, 2000. 432 p.

10. Mazur I.I., Shapiro V.D. Upravlenie kachestvom [Quality control]. Moscow: Omega-L, 2008. 399 p.

11. Adler Iu.P., Shchepetova S.E. Sistema ekonomiki kachestva [Quality economy system]. Moscow: Standarty i kachestvo, 2005. 184 p.

12. Korchunov A.G., Chukin M.V., Gun G.S., Poliakova M.A. Upravlenie kachestvom produktsii v tekhnologiiakh metiznogo proizvodstva [Quality management in the technology hardware production]. Moscow: Ruda i metally, 2012. 164 p.

13. Kuznetsov L.A. Sovremennyi podkhod k upravleniiu metallurgicheskoi tekhnologii [The modern approach to the management of the metallurgical technology]. *Proizvodstvo prokata*, 1999, no. 9, pp. 27-34.

14. Subetto A.I. Sochineniia. Noosferizm. Vol. 8. Kvalitativizm: filosofiia i teoriia kachestva, kvalitologiia, kachestvo zhizni, kachestvo cheloveka i kachestvo obrazovaniia [Works. Noosferizm]. Saint Peterburg; Kostroma, 2009. 392 p.

15. Bochkarev S.V., Petrachenkov A.B. Upravlenie kachestvom [Quality control]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008. 347 p.

16. Fedoseev S.A., Gitman M.B., Stolbov V.Iu., Vozhakov A.V. Upravlenie kachestvom produktsii na sovremennykh promyshlennykh predpriatiiakh [Quality management in modern industrial plants]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011. 229 p.

17. Gitman M.B., Stolbov V.Iu., Fedoseev S.A. Organizatsionnyi podkhod k upravleniiu kachestvom produktsii [The organizational approach to the management of product quality]. *Standarty i kachestvo*, 2012, no. 5, p. 80-84.

18. Il'iushin A.A. *Mekhanika sploshnoi sredy* [Continuum mechanics]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi universitet, 1978. 287 p.

19. Gitman M.B. *Vvedenie v stokhasticheskuiu optimizatsiiu* [Introduction to stochastic optimization]. Perm': Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008. 104 p.

20. Alekseev V.M., Tikhomirov V.M., Fomin S.V. *Optimal'noe upravlenie* [Optimal control]. Moscow: Fizmatlit, 2005. 384 p.

21. Kolmogorov V.L. *Napriazheniia. Deformatsii. Razrushenie* [Stress. Warp. Destruction]. Moscow: Metallurgiiia, 1970. 232 p.

22. Stolbov V.Iu., Trusov P.V. *Sviazannye zadachi optimizatsii protsessov uprugoplasticheskogo deformirovaniia metallov* [Related tasks process optimization elastic-plastic deformation of metals]. *Prikladnaia matematika i mekhanika*, 1999, vol. 63, no. 4, pp. 687-695.

23. Fedoseev S.A., Gitman M.B., Stolbov V.Iu. *Matematicheskie modeli upravleniia kachestvom produktsii na etape planirovaniia proizvodstva* [Mathematical model of quality management of products at the stage of production planning]. *Problemy upravleniia*, 2011, no. 4, pp. 60-67.

Получено 05.09.2016

Об авторах

Столбов Валерий Юрьевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: valeriy.stolbov@gmail.com).

Гитман Михаил Борисович (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Вычислительная математика и механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: gmb@pstu.ru).

Федосеев Сергей Анатольевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Вычислительная математика и механика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: fsa@gelicon.biz).

About the authors

Valerii Iu. Stolbov (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614099, Russian Federation, e-mail: valeriy.stolbov@gmail.com).

Mikhail B. Gitman (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Computational Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614099, Russian Federation, e-mail: gmb@pstu.ru).

Sergei A. Fedoseev (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computational Mathematics and Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: fsa@gelicon.biz).