

**Л. М. Акулович, Л. М. Кожуро, М. Л. Хейфец,
Е. З. Зевелева**

АНАЛИЗ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

На основании анализа самоорганизации поверхностных явлений предложены критерии для управления устойчивостью процессов высокоэффективной обработки. Рекомендовано создавать технологические комплексы высокоэффективной обработки в виде гибких производственных модулей.

Одним из путей повышения эффективности машиностроения является создание комплексов технологических, транспортных, энергетических и информационных машин и аппаратов, реализующих технологический процесс как логически завершенную часть производственного цикла. Такая совокупность машин получила название технологических комплексов [1, 2]. Поэтому к числу первоочередных проблем современного машиностроительного производства относится всемерное сокращение сроков создания и внедрения новых технологических комплексов на базе высокоэффективных технологий [3].

Основы оптимального проектирования технологического комплекса созданы Артоболовским [1] и Колпиным [2]. Его предложено осуществлять в два этапа: 1) структурный синтез, при котором рассматриваются принципиальные схемы решений, отвечающие исходным технологическим условиям; 2) параметрический синтез, в ходе которого схемное решение воплощается в конструктивные формы в виде совокупности конкретных механизмов, блоков, устройств и элементов технологического комплекса.

Методы анализа компоновок технологических комплексов включают [4]: 1) исследование структуры и предварительный отбор вариантов компоновок; 2) изучение влияния последних на характеристики качества, жесткости, точности, износостойкости элементов и рассмотрение методов их оптимизации.

В настоящее время известны методы анализа и оптимизации выбора компоновок [5] для автоматизированных сборочных технологических комплексов [1, 2], агрегатных станков [6, 7], автоматических роторных линий [2, 8] и многооперационных станков [4, 6, 9]. Однако вопросы структурного и параметрического синтеза при проектировании технологических комплексов, реализующих процессы высокоэффективной комбинированной обработки, еще не изучались.

В связи с этим актуальной является разработка методологии синтеза технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий, включающая:

а) обоснование выбора высокоэффективных комбинированных методов обработки, обеспечивающих ресурсосбережение при изготовлении и ремонте изделий машиностроения;

б) проектирование структуры универсального технологического комплекса высокоэффективной обработки, упрочнения и восстановления деталей машин;

в) оптимизацию параметров процессов, реализуемых технологическим комплексом высокоэффективной обработки деталей.

1. Формирование поверхностного слоя высокоэффективными методами обработки. Перспективным направлением в машиностроении является создание и внедрение в производство новых методов обработки, основанных

на сочетании в одном процессе различных видов энергии или различных способов воздействия на обрабатываемый материал.

В общем виде системная модель технологии [10, 11] представляется сочетанием трех входных потоков: вещества, энергии, информации. Метод обработки целесообразно рассматривать в виде подсистем: энергетической и информационной. Первая доставляет и преобразует энергию, необходимую для воздействия на заготовку с целью изменения ее физико-механических свойств, снятия или нанесения материала. Она определяется видом обработки. Вторая управляет потоками энергии и вещества, обеспечивая их доставку в необходимом количестве в заданное место рабочего пространства с целью обеспечения определенной формы, размеров и свойств поверхности детали.

Процесс обработки целесообразно рассматривать как некоторую энергетическую систему, воздействующую на заготовку с целью перехода ее из одного состояния в другое, соответствующее новому качеству [11, 12]. Это воздействие осуществляется в несколько этапов. На первом этапе подводимая энергия преобразуется в рабочую $\mathcal{E}_{\text{раб}}$ с помощью технологического оборудования. На втором этапе рабочая энергия превращается в энергию воздействия $\mathcal{E}_{\text{возд}}$ на обрабатываемый объект. На третьем этапе энергия воздействия приводит к образованию физико-химических механизмов $M_{\text{ф.х}}$ обработки заготовки, являющихся главным элементом формирования параметров метода обработки (производительность, энергозатраты, качество поверхности и т. п.).

Таким образом, процесс обработки (ПО) представляется в виде цепочки преобразования энергии

$$\text{ПО} = \{ \mathcal{E}_{\text{раб}} \Rightarrow \mathcal{E}_{\text{возд}} \Rightarrow M_{\text{ф.х}} \}. \quad (1)$$

Процессы формообразования (ФО) характеризуются составляющими [12]

$$\text{ФО} = \{ C_{\text{п.э}}, V_{\text{р.э}}, K_{\text{с.о}} \} \quad (2)$$

и их признаками: для $C_{\text{п.э}}$ – это точечный, линейный, поверхностный, объемный источник; для $V_{\text{р.э}}$ – непрерывное, пульсирующее, импульсное воздействие; для $K_{\text{с.о}}$ – прямолинейное, вращательное, два прямолинейных, вращательно-поступательное движение или его отсутствие.

В результате все методы обработки, во-первых, подразделяются на три класса: со съемом, без съема и с нанесением материала. Во-вторых, для каждого класса выделяются подклассы, характеризующие виды используемой при обработке энергии. В-третьих, существуют отличия по характеру физико-механического воздействия и, в-четвертых, – по виду используемого инструмента и кинематики обработки [10, 11].

На основании данной классификации предлагаются обобщенные модели метода обработки (МО), обычно представляемые [12, 13] аналитическим выражением вида

$$\text{МО} = \{ N_{\text{м.о}}, \text{ОП}_{\text{м.о}}, \mathcal{E}_{\text{раб}}, \mathcal{E}_{\text{возд}}, M_{\text{ф.х}}, K_{\text{с.о}}, V_{\text{р.э}}, C_{\text{п.э}}, S, G \}. \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) дают достаточно полное и наглядное представление о структуре и составе компонентов процессов обработки и формообразования. Их удобно использовать при создании новых технологических приемов и методов формообразования, но они не позволяют проводить каких-либо логических операций и преобразований. Для формализации условий целенаправленного формирования новых методов обработки каждая совокупность одноименных компонентов r_i описывается как некоторое множество технологических решений R_i . Такой подход [13] позволяет любой метод обработки $r_{\text{м.о}}$ представить в виде кортежа

$$r_{\text{м.о}} = (r_{\text{пов}}, r_{\text{м}}, r_{\text{обл}}, r_{\text{в.м}}, r_{\text{п.э}}, r_{\text{с.п.э}}, r_{\text{н.э}}, r_{\text{з.р}}, r_{\text{т}}, r_{\text{к}}, r_{\text{с}}). \quad (4)$$

Каждый элемент кортежа (4) является компонентом соответствующего множества технологических решений, т. е. $\{r_i\} = R_i$ или $r_i \in R_i$.

Наличие конкретного свойства α у технологического решения r_i выражается с помощью соответствующего предиката

$$E_{\alpha}(r_i), \quad (5)$$

утверждающего, что технологическое решение r_i обладает свойством α .

Каждое свойство α может принимать множество значений θ_{α} . Тогда выражение

$$E_{\alpha}(r_i) \wedge \theta_{\alpha} \quad (6)$$

показывает, что технологическое решение r_i обладает свойством α и значение последнего есть θ_{α} .

Предикат (5) позволяет выбирать технологические решения с заданным свойством, значение которого определяется с помощью формулы (6).

В общем случае технологическое решение r_i характеризуется рядом свойств $\alpha, \delta, \dots, \gamma$, каждое из которых может принимать различные значения, что выражается формулой

$$\forall r_i \exists \alpha \exists \delta \dots \exists \gamma \left\{ \left[E_{\alpha}(r_i) \wedge \left(\bigvee_{j=1}^n \theta_{\alpha_j} \right) \right] \wedge \right. \\ \left. \wedge \left[E_{\delta}(r_i) \wedge \left(\bigvee_{k=1}^m \theta_{\delta_k} \right) \right] \wedge \dots \wedge \left[E_{\gamma}(r_i) \wedge \left(\bigvee_{p=1}^q \theta_{\gamma_p} \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

Между значениями свойств решения r_i могут существовать определенные взаимосвязи и не всякое их сочетание является допустимым, т. е. технологическое решение r_i обладает свойством α со значением $\theta_{\alpha n}$ и свойством δ , значение которого определяется множеством $\theta_{\delta p j}$. Подобная ситуация описывается соотношением

$$\exists \alpha \exists \delta \forall r_i \left[E_{\alpha}(r_i) \wedge \theta_{\alpha n} \rightarrow E_{\delta}(r_i) \wedge \left(\bigvee_{j=1}^k \theta_{\delta p j} \right) \right]. \quad (8)$$

Полагаем, что если два любых компонента метода обработки обладают хотя бы одним общим свойством, то между ними существует связь по общности свойств. Это дает возможность организовать выбор технологических решений по эквивалентности и предпочтению [13]. По первому признаку выбираются равноименные решения, совокупность свойств которых соответствует друг другу:

$$\exists \alpha \forall r_i \forall r_j \left[E_{\alpha}(r_i) \wedge E_{\alpha}(r_j) \wedge (\theta_{\alpha}^i = \theta_{\alpha}^j) \rightarrow (r_i \approx r_j) \right], \quad (9)$$

а по второму выбирают решения из числа одноименных, обладающих наилучшими значениями необходимых свойств:

$$\exists \theta_{\alpha} \forall r_{i1} \forall r_{i2} \left[E_{\alpha}(r_{i1}) \wedge E_{\alpha}(r_{i2}) \wedge (\theta_{\alpha}^{i1} \leq \theta_{\alpha}^{i2}) \rightarrow (r_{i1} \approx r_{i2}) \right]. \quad (10)$$

Такой подход, согласно (9), (10), позволяет формализовать поиск технологического решения r_i по конкретному значению установленного критерия выбора t_q :

$$\theta_{\alpha}^i h t_q. \quad (11)$$

Тогда совокупность предикатов вида (11) позволяет выбрать решение r_i по нескольким критериям выбора $t_{q1}, t_{q2}, \dots, t_{qn}$, которые соответствуют n различным свойствам решения r_i . В этом случае условие выбора решения r_i принимает вид

$$\bigwedge_{j=1}^n (\theta_{\alpha_j}^i h_i t_{qj}). \quad (12)$$

Применение выражения (12) в задачах выбора равноименных технологических решений, обладающих различными, но взаимозависимыми свойст-

вами α и δ , т. е. выполняется условие $E_\alpha(r_i) \rightarrow E_\delta(r_j)$, позволяет организовать выбор решений

$$\exists \theta_\alpha \vee r_i \vee r_j [E_\alpha(r_i) \wedge E_\delta(r_j) \wedge (\theta_\alpha^1 h_1 t_1) \wedge (\theta_\delta^2 h_2 t_2) \rightarrow (r_i \approx r_j)] . \quad (13)$$

Однако в общем случае условие (13) не выполняется, так как часто не известны взаимосвязи свойств решений r_i и r_j : $E_\alpha(r_i) \rightarrow E_\delta(r_j)$. Кроме того, при обосновании выбора технологических решений и синтезе комбинированных методов необходимо учитывать стабильность формирования параметров качества обработки и рассматривать механизмы управления устойчивостью технологического процесса путем применения обратных связей [14]. Поэтому в качестве целевой функции вместо конкретных значений совокупности критериев выбора $t_{q1}, t_{q2}, \dots, t_{qn}$ предлагается использовать критерии процессов самоорганизации [15], поскольку условия, обеспечивающие самоорганизацию поверхностных явлений и стабилизацию формирования параметров качества обработки, являясь следствием избыточности рассматриваемой технологической системы по структурному составу [1].

2. Анализ самоорганизации поверхностных явлений в процессах обработки. Взаимосвязанные процессы движения и обмена материальными и информационными потоками в технологической системе описываются энтропией [16, 17]

$$\epsilon = - \kappa \int_0^{\infty} p \ln p dp .$$

Уравнение баланса локальной плотности энтропии $\rho\epsilon$ по времени τ

$$\partial (\rho\epsilon) / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho\epsilon \mathbf{v}) + \nabla \cdot \mathbf{F}_\epsilon = \sigma . \quad (14)$$

Производство энтропии $\sigma = d\epsilon / d\tau$ дает возможность рассмотреть критерии, описывающие различные состояния рабочей зоны технологической системы.

Исследование состояний рабочей зоны, изучение самоорганизации технологических процессов при комбинированных методах обработки [15] позволили рассмотреть модель анализа процессов формирования изделий:

$$\partial \rho / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 ; \quad (15)$$

$$\partial (\rho \mathbf{v}) / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) + \nabla \cdot \mathbf{P} = \rho \sum_{i=1}^K \mathbf{F}_{mi} ; \quad (16)$$

$$\partial (\rho \epsilon) / \partial \tau + \nabla \cdot (\rho \epsilon \mathbf{v}) + \nabla \cdot \mathbf{F}_\epsilon = \sum_{i=1}^K \mathbf{F}_{mi} \mathbf{F}_{di} - \mathbf{P} \cdot \nabla \mathbf{v} ; \quad (17)$$

$$\partial C_i / \partial \tau + \nabla \cdot (C_i \mathbf{v}) + \nabla \cdot \mathbf{F}_{di} = \sum_{r=1}^{R_i} v_{i,r} \omega_r , \quad (18)$$

в которой:

$$\rho = \sum_{i=1}^K M_i C_i ; \quad (19)$$

$$\mathbf{F}_\epsilon = \left(\mathbf{F}_q - \sum_{i=1}^K \mathbf{F}_{di} W_i \right) / T ; \quad (20)$$

$$\sigma = \mathbf{F}_q \cdot [\nabla (1/T)] - \sum_{i=1}^K \mathbf{F}_{di} \cdot [\nabla (W_i/T) - (1/T) \mathbf{F}_{mi}] - \\ - (1/T) \mathbf{P}_{\text{лнс}} \cdot \nabla \mathbf{v} + (1/T) \sum_{i=1}^K W_i \sum_{r=1}^{R_0} v_{i,r} \omega_r . \quad (21)$$

Аналитическая модель (14)–(18) структурных изменений и фазовых переходов обрабатываемого материала при формировании поверхности, описываемая состоянием (19)–(21), устанавливает критериями переноса последовательность образования структур и фаз при увеличении мощности воздействий

$$Pe \rightarrow Re \rightarrow Gr \rightarrow Ra ,$$

в которой:

$$Pe = vl/\omega ; \quad (22)$$

$$Re = vt/\nu ; \quad (23)$$

$$Gr = \sigma_n \nabla T t^2 / (\rho \omega \nu) ; \quad (24)$$

$$Gr = \beta g \nabla T t^3 / \nu^2 ; \quad (25)$$

$$Ra = \beta g \nabla T t^4 / (\omega \nu) . \quad (26)$$

Использование критериев образования структур и фаз (22)–(26) многократно сокращает объем экспериментальных исследований процессов формирования поверхностного слоя при высокоэффективных методах обработки.

В случаях, когда физико-химические механизмы формирования поверхностного слоя не известны, предложено описывать процессы не системой уравнений баланса (14)–(18), а законами распределения случайных величин [15].

Судить о степени соответствия статистических данных выбранному закону распределения позволяет отношение Романовского [18]

$$R = (\lambda_p^2 - k) / \sqrt{2k} . \quad (27)$$

Статистический анализ параметров качества изучаемых методов обработки позволяет выделить наиболее значимые технологические факторы и выявить их взаимосвязи. Формирование технологических регламентов изучаемых методов обработки только из узких диапазонов режимов, ограниченных условиями самоорганизации, создает условия для стабилизации параметров качества поверхностного слоя.

При выборе количества элементов и процессов, реализуемых технологическим комплексом, целесообразно рассмотреть взаимозависимость противоречивых требований к производственной системе по ее надежности и гибкости. Соотношение надежности – устойчивости и гибкости – адаптивности может служить критерием, позволяющим принять решение о рациональной структуре технологического комплекса.

В самоорганизующихся системах можно управлять гибкостью и надежностью, изменяя число подсистем [17]. Каждая подсистема i имеет выходы: детерминированный строго определенный q_1 и флуктуирующий с рассеянными характеристиками q_2 . Полный выход подсистемы в первом приближении с учетом аддитивности материальных и информационных потоков

$$q^{(i)} = q_1^{(i)} + q_2^{(i)} . \quad (28)$$

Считая, что в условиях производства $q^{(i)}$ – независимая случайная величина, полную величину выхода представим как

$$Q = \sum_{i=1}^n q^{(i)} \quad (29)$$

Полный выход (29), согласно предельной центральной теореме [17], увеличивается пропорционально числу подсистем n , в то время как степень рассеяния растет пропорционально квадратному корню $\sqrt{n}$ аналогично отношению (27). Эти оценки основаны на анализе линейного соотношения (28), на самом же деле обратная связь, присущая уравнениям (14)–(18), приводит к еще более значительному подавлению рассеяния характеристик.

Таким образом, создание технологических комплексов высокоэффективной обработки, обеспечивающих стабилизацию параметров качества детали и автоматизацию управления технологическими процессами целесообразно проводить на основе выполнения условий для самоорганизации поверхностных явлений.

Согласно классификации методов обработки, рассмотрим самоорганизацию в процессах нанесения, термообработки, деформирования и резания поверхностных слоев изделий, а также при сочетании нанесения покрытий и термообработки с деформированием и резанием в комбинированных методах обработки.

3. Совмещение процессов в комбинированных методах высокоэффективной обработки. Одновременное применение при обработке нескольких потоков энергии, передаваемых в рабочую зону как технологической средой, так и инструментом с исполнительными органами, резко повышает производительность технологических операций [19]. Однако при совместном использовании нескольких потоков возникают технологические ограничения по устойчивости комбинированных процессов. Поэтому принципиально новые технологические комплексы для комбинированной обработки в настоящее время можно создавать на основе использования процессов самоорганизации в технологических системах [20].

Для производства изделий с помощью технологических комплексов целесообразно использовать термомеханические и электромагнитные потоки вещества и энергии, так как процессы формирования поверхностей объектов производства, вплоть до микронной точности, носят в основном термомеханический характер, а электромагнитные потоки (вследствие простоты их формирования и удобства в управлении) наиболее технологичны [19, 21].

Рассмотрим всю гамму технологических операций: нанесение покрытий, термообработку, деформирование и резание поверхностных слоев обрабатываемых изделий и их основные комбинации [10, 11, 19], которые должны реализовываться технологическими комплексами при комбинированной электромагнитной и термомеханической обработке изделий. Для нанесения поверхностного слоя используется метод электромагнитной наплавки [21], при котором частицы ферромагнитного порошка выстраиваются в постоянном магнитном поле в электроды-цепочки и в результате электродуговых разрядов наплавляются на поверхность заготовки. Этот метод позволяет наносить покрытие только определенной толщины, после чего формируемый слой теряет устойчивость, на поверхности образуются выступы, которые при последующих разрядах разрушаются. Процессами формирования поверхности управляют электромагнитные потоки, которые помимо фиксации частиц ферропорошка обеспечивают интенсивное тепловыделение в местах их контакта и вне зависимости от расхода порошка, изменяя электросопротивление наплаваемого слоя, регулируют его толщину [22].

Для поверхностной термообработки изделий применим местный индукционный, электроконтактный подогрев или электроискровой разряд, позволяющие помимо нагрева проводить легирование поверхностного слоя предметов обработки как при использовании частиц ферропорошка, так и при введении присадок в смазочно-охлаждающие жидкости. Управлять и глубиной, и степенью упрочнения поверхностного слоя в процессах термообработки и легирования позволяют главным образом электромагнитные потоки в рабочей зоне [22].

Для деформационного упрочнения и формоизменения поверхностных слоев в технологических комплексах используют шариковые обкатники.

При поверхностном пластическом деформировании дополнительные степени свободы позволяют шарiku в результате взаимодействия с обрабатываемой поверхностью помимо качения совершать вращение. Без дополнительного нагрева степень деформации невелика, а траектория шарика имеет петлеобразный характер. При нагреве обрабатываемый металл переходит в пластичное состояние, вследствие чего степень деформации и коэффициент трения скольжения увеличиваются. Это препятствует вращению и уменьшает длину сначала пикообразной, а затем и синусоидальной траектории шарика, что приводит к снижению интенсивности пластической деформации. Таким образом, управлять процессом поверхностного пластического деформирования позволяет термическое воздействие и дополнительное вращение шарика [22].

Резание технологический комплекс осуществляет традиционными резцами, фрезами, шлифовальными кругами и свободным абразивом в магнитном поле [23, 24].

При резании традиционным лезвийным инструментом в процессе обработки с предварительным нагревом нарушается равновесие интенсивностей температурного разупрочнения и деформационного упрочнения, зона стружкообразования теряет устойчивость и начинает перемещаться, изменяя угол сдвига. Управлять процессом стружкообразования в этом случае можно путем дополнительного перемещения ротационного инструмента, не позволяющего заторможенным объемам металла закрепиться на лезвии и обновляющего рабочий участок режущей кромки, предохраняя от резкого возрастания температуры в локализованном объеме зоны стружкообразования [25].

В процессе шлифования абразивным кругом с увеличением глубины резания при врезании или колебании припуска возрастают силы резания и трения, которые способствуют активному выкрашиванию абразивных частиц круга. Вследствие этого возрастают интенсивность изнашивания круга и скорость переноса выкрашенных частиц, сопровождающиеся нагревом. В результате снижаются силы резания и трения, что приводит к падению интенсивности процесса выкрашивания. Такие колебания интенсивности позволяют обновлять абразивные частицы круга, управлять процессом шлифования [26].

Обработка вязких и пластичных материалов абразивным кругом приводит к засаливанию, что препятствует его самозатачиванию. Управлять процессом шлифования в этом случае позволяют электромагнитные потоки при магнитно-абразивной обработке, в которой механохимический съем металла осуществляется незакрепленными зернами абразивного порошка с ферромагнитным покрытием под воздействием постоянного магнитного поля [23, 24].

Результаты исследования самоорганизации в процессах нанесения, термообработки, деформирования и резания поверхностных слоев изделий, а также при сочетании нанесения покрытий и термообработки с деформированием и резанием в комбинированных методах обработки позволили сделать вывод о том, что технологический комплекс может длительное время работать устойчиво в автоматическом режиме и не требует внешних управляющих воздействий. Это указывает на целесообразность проектирования технологических комплексов в виде автономных гибких производственных модулей комбинированной электромагнитной и термомеханической обработки изделий.

Обозначения

$\mathcal{E}_{\text{раб}}$ – рабочая энергия; $\mathcal{E}_{\text{возд}}$ – энергия воздействия; $M_{\text{ф.х}}$ – физико-химический механизм; $C_{\text{п.э}}$ – способ подвода энергии в пространстве; $V_{\text{р.э}}$ – вид распределения энергии во времени; $K_{\text{с.о}}$ – кинематическая схема обработки; $H_{\text{м.о}}$ – наименование метода обработки; $ОП_{\text{м.о}}$ – область применения метода обработки; S – схема базирования и закрепления заготовки; G – обрабатывающий инструмент; R_i – множество технологических решений; r_i – технологическое решение; $r_{\text{м.о}}$ – вид метода обработки; $r_{\text{пов}}$ – обрабатываемая поверхность детали; $r_{\text{м}}$ – обрабатываемый материал; $r_{\text{обл}}$ – вид области применения метода обработки; $r_{\text{в.м}}$ – способ воздействия на материал заготовки; $r_{\text{п.э}}$ – вид энергии, подводимой в зону обработки; $r_{\text{с.п.э}}$

– вид способа подвода энергии в зону обработки; $r_{иэ}$ – источник энергии; $r_{рэ}$ – энергетический режим обработки; r_t – обрабатывающий технологический инструмент; r_k – вид кинематической схемы обработки; r_c – статическая схема обработки; E – предикат; $\alpha, \delta, \dots, \gamma$ – свойства технологического решения r_i ; θ_α – множество значений свойства α ; $\forall$ – квантор всеобщности; $\exists$ – квантор существования; h – символ отношения предпочтения, который может принимать значения $>, \geq, <, \leq$; t_q – критерий выбора; ε – энтропия; κ – постоянный коэффициент; p – плотность распределения вероятных состояний подсистемы; pe – локальная плотность энтропии; τ – текущее время; F_ε – плотность потока энтропии; v – скорость потока; σ – производство энтропии; ρ – массовая плотность обрабатываемого материала; ρv – плотность импульса; pe – плотность энергии; $\mathbf{P}$ – тензор давления; K – число компонентов; $\mathbf{F}_{mi}$ – сила масс, действующая на i -й компонент; $\mathbf{F}_q$ – плотность теплового потока; $\mathbf{F}_{di}$ – плотность диффузионного потока i -го компонента; R_0 – число протекающих реакций; $v_{i,r}$ – стехиометрический коэффициент i -го компонента r -й реакции; M_i – молекулярная масса i -го компонента; ∇ – оператор Лапласа; C_i – концентрация i -го компонента; W_i – химический потенциал i -го компонента; T – абсолютная температура; $\mathbf{P}_{дис}$ – диссипативная часть тензора давления, описывающая вязкие силы; Re – критерий Пекле; Re – критерий Рейнольдса; Mg – критерий Марангони; Gg – критерий Грасгофа; Ra – критерий Рэлея; l – характерный размер в направлении движения источника тепла; ω – коэффициент теплопроводности; t – толщина обрабатываемого поверхностного слоя; ν – коэффициент кинематической вязкости; σ_n – коэффициент поверхностного натяжения; β – коэффициент объемного расширения; g – ускорение свободного падения; R – отношение Романовского; λ_p^* – критерий Пирсона; k – число степеней свободы, используемых при вычислении теоретического распределения статистических характеристик; $q^{(v)}$ – полный выход подсистемы; $q_1^{(d)}$ – детерминированный выход; $q_2^{(f)}$ – флуктуирующий выход; Q – полный выход системы. Математические знаки: $\Rightarrow$ – следовательно; $\wedge$ – конъюнктивно; $\vee$ – диссипативно; $\rightarrow$ – отображение; $\approx$ – приближенно.

Литература

1. Артоболевский И. И., Ильинский Д. Я. Основы синтеза систем машин автоматического действия. М., 1983.
2. Кошкин Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии. М., 1982.
3. Сироткин О. // Экономист. 1998. № 4. С. 3–9.
4. Врагов Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: Основы компоновки. М., 1978.
5. Бусленко Н. П. Математическое моделирование производственных процессов. М., 1964.
6. Гебель Х. Компоновка агрегатных станков и автоматических линий. М., 1969.
7. Дащенко А. И. // Теория машин автоматического действия. М., 1970. С. 75–84.
8. Клусов И. А., Сафарянц А. Р. Роторные линии. М., 1969.
9. Маталин А. А., Дашевский Т. Б., Княжицкий И. И. Многооперационные станки. М., 1974.
10. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. М., 1985.
11. Рыжов Э. В., Аверченков В. И. Оптимизация технологических процессов механической обработки. Киев, 1989.
12. Аверченков В. И. // Трение и износ. 1997. Т. 18, № 3. С. 339–348.
13. Голоденко Б. А., Смоленцев В. П. // Вестник машиностроения. 1994. № 4. С. 25–28.
14. Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л., Чемисов Б. П. // Докл. НАН Беларуси. 1997. Т. 41, № 3. С. 121–127.
15. Ящерицын П. И., Шипко А. А., Хейфец М. Л., Попок Н. Н. // Докл. НАН Беларуси. 1996. Т. 40, № 1. С. 118–121.
16. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах: Введение в теорию диссипативных структур. М., 1979.
17. Хакен Г. Синергетика. М., 1980.
18. Пасхвер И. С. Закон больших чисел и статистические закономерности. М., 1974.
19. Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Сенчило И. А., Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1995. Т. 39, № 1. С. 112–116.

20. Ящерицын П. И., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л. // Вестник машиностроения. 1996. № 3. С. 33-36.
21. Ящерицын П. И., Деев Г. А., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л. // Докл. АН Беларуси. 1993. Т. 37, № 4. С. 114-117.
22. Кожуро Л. М., Хейфец М. Л. // ИФЖ. 1995. Т. 68, № 4. С. 606-612.
23. Ящерицын П. И., Деев Г. А., Кожуро Л. М. // Вестник машиностроения. 1994. № 3. С. 42-44.
24. Ящерицын П. И., Забавский М. Т., Кожуро Л. М., Акулович Л. М. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле. Минск, 1988.
25. Кожуро Л. М., Мрочек Ж. А., Хейфец М. Л., Шипко А. А., Акулович Л. М. Обработка износостойких покрытий. Минск, 1997.
26. Ящерицын П. И., Борисенко А. В., Хейфец М. Л. // Изв. АН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 1992. № 1. С. 48-53.

*Конструкторско-технологический
институт средств механизации
и автоматизации, г. Минск
Полоцкий государственный университет,
г. Новополоцк,
Белорусский государственный аграрный
технический университет, г. Минск*

Поступила 24.08.1998.