

УДК 620.93

Математическая модель кузнечно-штамповочного производства с двухуровневой оптимизацией энергетических затрат

Горбунов В.А., канд. техн. наук

Представлена методика математического моделирования кузнечно-штамповочного производства, позволяющая моделировать процессы с оптимизацией энергетических затрат при производстве продукции. Предложено для решения задачи двухуровневой оптимизации использование теплотехнологического параметра стабилизации режима работы установки «печь-молот».

Ключевые слова: математическая модель, кузнечно-штамповочное производство, параметр стабилизации, оптимизация.

Mathematical Model of Forge-and-stamping Production with Two-level Optimization of Power Consumptions

V.A. Gorbunov, Candidate of Engineering

The technique of mathematical modeling of forge-and-stamping production is described. This method allows to simulate processes with optimization of power consumptions when output of products is submitted. The author considers the using of technological parameter technique of “stove-hammer” unit operation stabilization to solve two-level optimization problem.

Key words: mathematical model, forge-and-stamping production, stabilization parameter, optimization.

Сбережение энергоресурсов зависит как от снижения себестоимости за счет оптимизации режимов работы установок, так и от уменьшения издержек производства, связанных с его организацией: распределением номенклатуры между печами, очередностью нагрева типоразмеров заготовок, оптимизацией партии каждого типоразмера.

Математическая модель установки оптимизирует режимы ее работы, но связи и взаимодействия между установками не учитывает. Задачей математического моделирования производства является максимальный учет всех взаимосвязей работы установок различной производительности и оптимизация организации работы установок в целом для производства.

С ростом производительности вычислительной техники появилась возможность разработки математической модели по организации производства на основе учета оптимальной работы каждой установки. В [1] разработана математическая модель кузнечно-штамповочного производства, которая позволяла оптимизировать очередность нагрева типоразмеров заготовок в печи, оптимально распределять обрабатываемые типоразмеры между печами и определять оптимальный размер партии нагреваемых изделий каждого типоразмера. В качестве целевой функции в этой модели был выбран минимум издержек производства. В модели предложено использовать параметр стабилизации режима работы установки «печь-молот».

Математическая модель «печь-молот» [2] оптимизирует себестоимость цехового передела на основе трех варьируемых параметров: температуры на поверхности, температурного

перепада по сечению металла в конце нагрева и параметра, связанного с размещением заготовок на подине печи (отношение расстояния между заготовками к высоте заготовок). В модели используется ряд технических ограничений: по температуре газов в рабочем пространстве печи, которая не может превышать действительную температуру горения топлива; по темпу выдачи заготовок из печи, который не должен быть меньше времениковки; по допустимому температурному перепаду во время начального нагрева, который зависит от допустимых температурных напряжений и температур по применению огнеупорных и изоляционных материалов, из которых выполнена трехслойная кладка печи; по мощности горелок; по производительности установки.

Если принять в качестве первого уровня оптимизации кузнечно-штамповочного производства математическую модель «печь-молот» (рис. 1), то можно получить ответ на вопросы: Как греть? Сколько заготовок одного типоразмера должно быть в печи? Какое должно быть давление газа перед горелками для нагрева каждого типоразмера? Сколько времени необходимо нагревать заготовку? Математическая модель «печь-молот» дает ответы на эти вопросы с учетом минимальной себестоимости цехового передела.

При рассмотрении кузнечно-штамповочного производства в целом остается еще ряд вопросов, которые приходится решать (рис. 2): Где? На какой установке «печь-молот» производить обработку изделий? Когда? Какова должна быть очередность обработки различных типоразмеров заготовок?

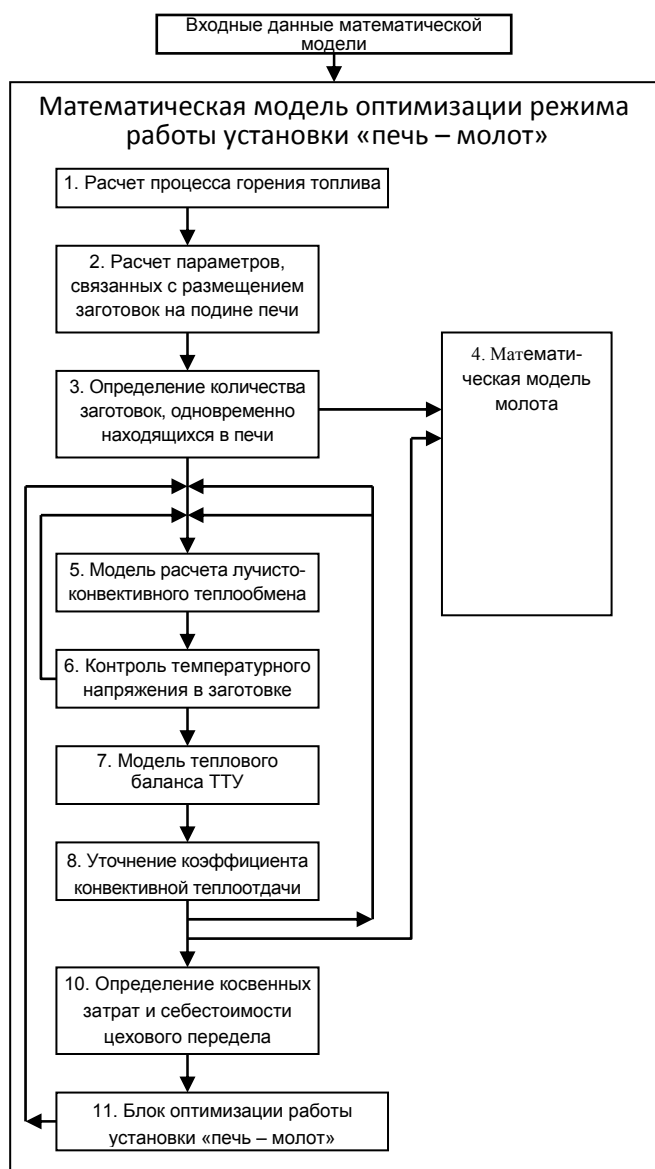


Рис. 1. Структурная схема модели «печь – молот»

Сколько их должно быть (размер партии изделий одного типоразмера)? Для ответа на эти вопросы можно воспользоваться моделью «печь–молот». Необходимо просмотреть все варианты обработки заготовок на разных установках, а затем выбрать вариант с оптимальной себестоимостью производства всех поковок, произведенных в цехе за год. Решить такую задачу очень сложно из-за очень большого количества вариантов.

Предлагается экстенсивный путь для решения этой задачи, который основан на использовании параметра стабилизации.

Если учесть, что в кузнечных печах нагреваются заготовки сравнительно небольших раз-

меров, то понятие *параметра стабилизации* вытекает из решения задачи теплопроводности для тел умеренной массивности, нагреваемых в среде с постоянной температурой при граничных условиях 3-го рода [3, 4]:

$$\frac{T_g - T_{m,k}}{T_g - T_{m,0}} = \exp\left(-\frac{\alpha_\Sigma \tau}{c_M R_g m}\right), \quad (1)$$

где T_g – температура газа в камере печи, К; $T_{m,0}$, $T_{m,k}$ – начальная и конечная температуры металла соответственно, К; $R_g = V_M / f_{зф}$ – обобщенный размер заготовки, м; V_M – объем нагреваемого металла, м³; $f_{зф}$ – эффективная поверхность металла при радиационном теплообмене в системе газ–кладка–металл, м²; $m = 1 + \alpha_\Sigma R_g / [(k + 2)\lambda_M]$ – поправка на массивность; α_Σ – приведенный коэффициент теплоотдачи, учитывающий радиационную и конвективную составляющие, Вт/(м²·К); τ – время нагрева заготовки, с; c_M – удельная теплоемкость металла, Дж/(м³·К); k – коэффициент формы тела; λ_M – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·К).

Формула (1) предполагает, что сложный радиационно-конвективный поток на металл приведен к условно конвективному виду с суммарным коэффициентом теплоотдачи α_Σ .

При заданной конечной температуре металла температура газа будет постоянной при постоянном показателе экспоненты. Стабильный температурный режим печи определяется стабилизацией параметра, который представляет отношение количества теплоты, подведенной к металлу при единичном температурном напоре за время нагрева, к энергии, усвоенной металлом при единичном приращении температуры:

$$KI = \frac{\alpha_\Sigma \tau}{c_M R_g m}. \quad (2)$$

При усредненных за время нагрева значениях α_Σ , c_M , λ_M параметр стабилизации KI является для заготовок каждого типоразмера постоянной величиной.

В печах с непрерывным процессом загрузки и выгрузки время нагрева и время ковки связаны между собой соотношением

$$\tau = \tau_k n = \tau_k F_{акт} / f, \quad (3)$$

где τ_k – время ковки заготовки, с; n – число заготовок, одновременно находящихся в печи, шт.; $F_{акт}$ – площадь активного пода, м²; f – площадь пода, занятая одной заготовкой с относящимися к ней зазорами, м².

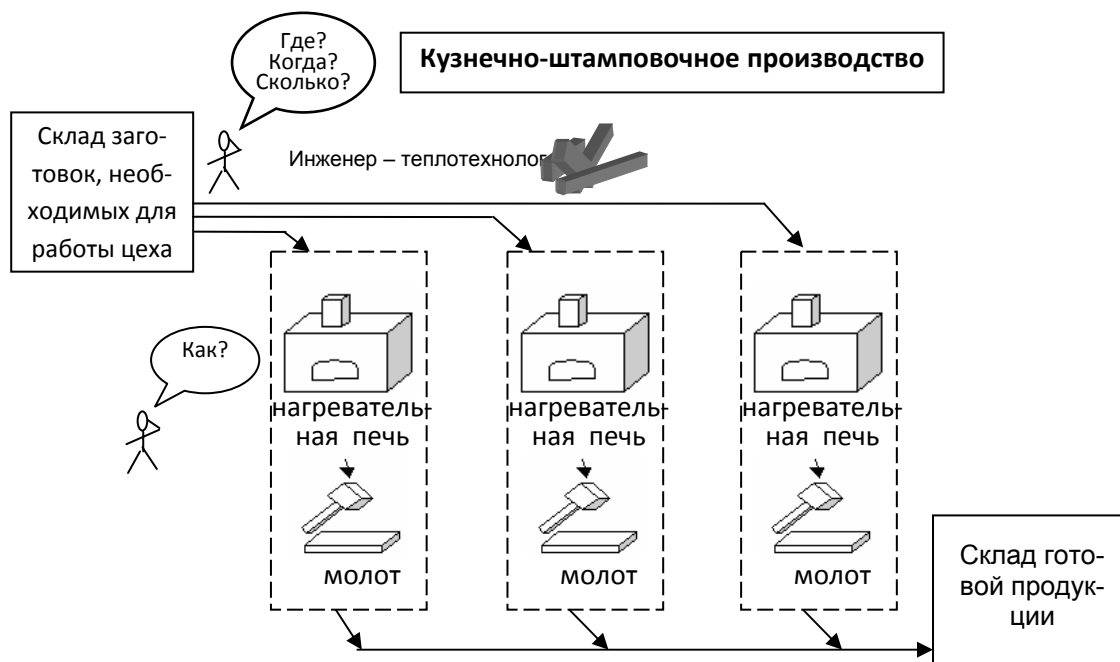


Рис. 2. Работа кузнечно-штамповочного производства с участием инженера-теплотехнолога

Если принять, что для конкретной печи площадь активного пода постоянна $F_{акт} = const$, суммарный коэффициент теплоотдачи α_{Σ} , являющийся функцией температуры газа, конечной температуры металла и обобщенного размера заготовки: $\alpha_{\Sigma} = f(T_g, T_{м,к}, R_g)$, изменяется в пределах $\alpha_{\Sigma} = 300\text{--}500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и в нулевом приближении может быть средним и постоянным и удельная теплоемкость металла c_M также слабо зависит от температуры, поэтому приблизительно постоянно $c_M = const$, то, исходя из формулы (2), для стабилизации режима работы печи постоянным должно поддерживаться отношение

$$Kl = \tau_k f_{эф} / (V_M f m). \quad (4)$$

Это выражение с принятыми допущениями называется [1] параметром стабилизации температурного режима печи. Величины, входящие в формулу (4), относятся к геометрическим размерам нагреваемых заготовок, геометрическим размерам зазоров между заготовками, времени обработки под молотом, форме заготовок и теплофизическим характеристикам нагреваемого материала. Все эти параметры нагреваемых заготовок можно легко найти.

Математическую модель работы кузнечно-штамповочного производства, построенную на основе параметра стабилизации, предлагается

использовать в качестве второго уровня оптимизации. Для этого необходимо произвести уточнение параметра стабилизации на основе использования математической модели «печь-молот». В выше приведенном алгоритме для определения параметра стабилизации используются усредненные значения $c_M, \alpha_{\Sigma}, F_{акт}, m$, которые не учитывают особенности нагрева того или иного типоразмера, связанные с его оптимальными параметрами и действующими ограничениями. Их определение с учетом расчета оптимального режима в модели «печь-молот» позволит уточнить параметр стабилизации. Для этих целей необходимо разработать математическую модель кузнечно-штамповочного производства, которая использовала бы обе математические модели в одном комплексе (рис. 3) и позволила бы решать ряд новых задач, которые напрямую связаны с ресурсо- и энергосбережением кузнечно-штамповочных производств.

В [5] решена задача по определению производительности установок на основе параметра стабилизации, без учета оптимального режима работы установки «печь-молот». Параметр стабилизации при работе этого алгоритма принимался с постоянными коэффициентами $\alpha_{\Sigma}, c, f_{эф}$.

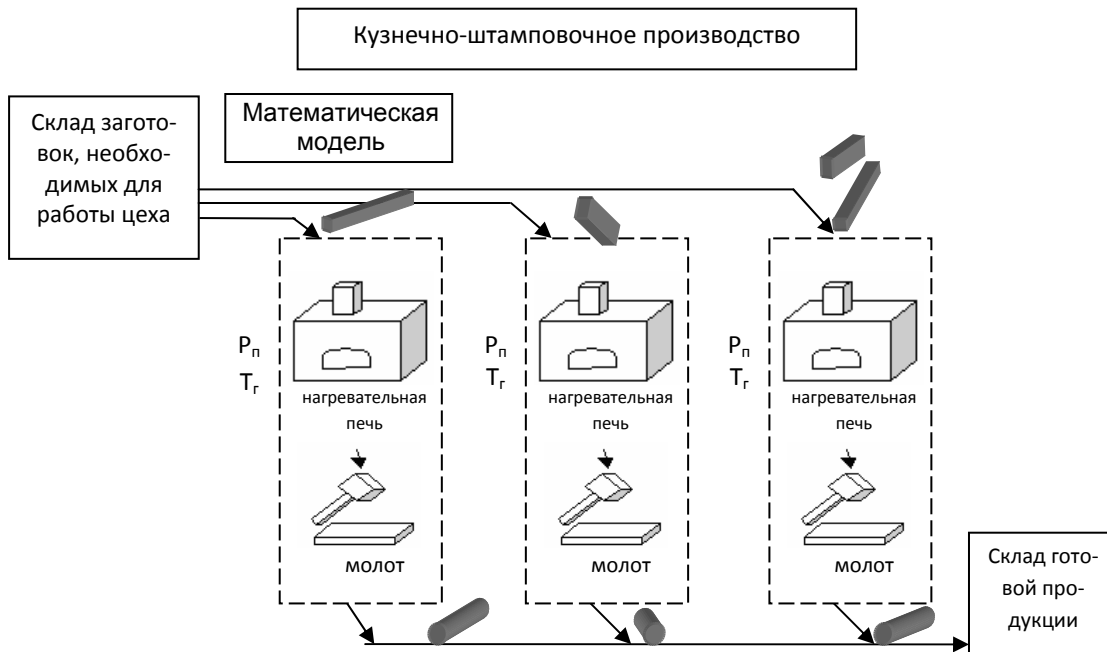


Рис. 3. Работа кузнечно-штамповочного производства с использованием математической модели

Первый этап расчета первого уровня оптимизации производится с помощью программы оптимального распределения номенклатуры заготовок между печами проектируемого цеха. Производительность печей неизвестна, условием распределения является минимум суммы средневзвешенных квадратичных отклонений от среднего критерия стабилизации для данной печи. Программа позволяет выбрать для известной номенклатуры цеха и известного количества печей их оптимальную производительность.

По результатам работы программы в файл записывается приближенное распределение номенклатуры заготовок по печам в порядке возрастания параметра стабилизации и определяется производительность печей.

Вторым этапом оптимизации является уточнение параметров стабилизации. Уточненные параметры стабилизации рассчитываются в программе оптимизации режима работы теплотехнологической установки «печь–молот» кузнечно-штамповочного производства, алгоритм расчета приведен на рис. 1. Программа работает с операционной системой Windows и имеет графический интерфейс. Рассмотрим расчет уточненного параметра стабилизации на примере одной заготовки – для печи 1, работающей с молотом 1. Для этого в программе необходимо выбрать входные данные для печи 1 и нажать «Далее» (рис. 4).

После нажатия кнопки «Далее» появится новое окно, где необходимо будет выбрать входные данные по конструкции вспомога-

тельного оборудования и качеству нагрева. В нижнем левом углу выбираем в первом поле «Печь1», а во втором «1» и нажимаем «Далее» (рис. 5).

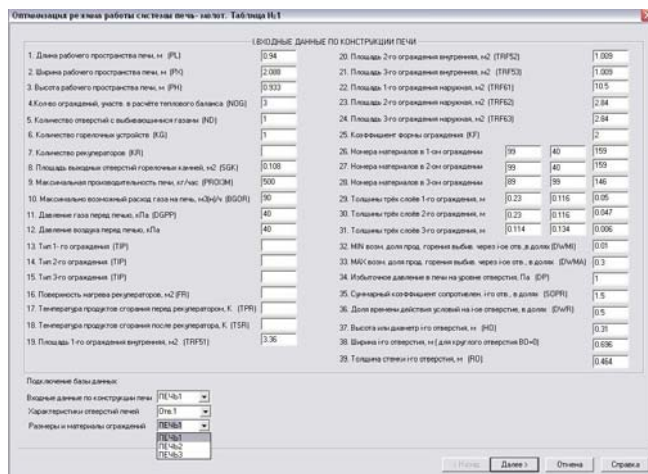


Рис. 4. Выбор параметров печи

В следующем окне в поле «Характеристики нагреваемых заготовок» выбирается заводской номер заготовки, например №501410, в поле «Теплофизические и физические свойства металла» выбираем сталь 20X (так как эта заготовка выполнена из стали 20X), а в поле «Конструкция молота» выбираем «МОЛОТ1» и нажимаем «Далее» (рис. 6).

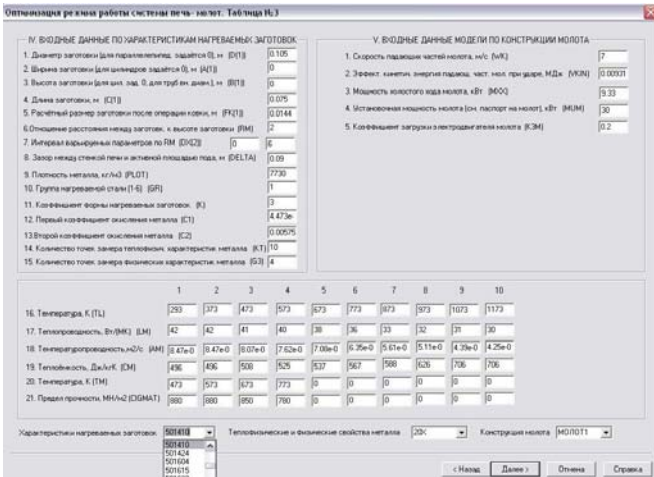


Рис. 5. Выбор входных данных по конструкции вспомогательного оборудования и качеству нагрева

В пятом окне (рис. 8) выбираются входные данные по стоимостным показателям работы оборудования и цеха и нажимается кнопка «Далее», а в следующем окне кнопка «Готово» (рис. 9).

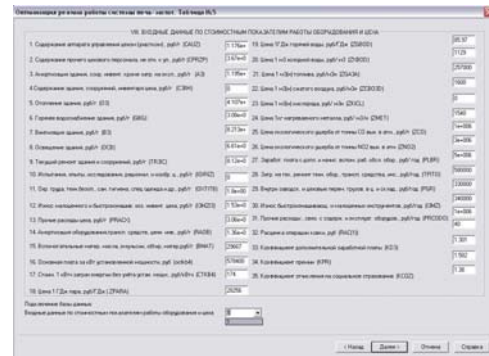


Рис. 8. Входные данные по стоимостным показателям работы оборудования и цеха

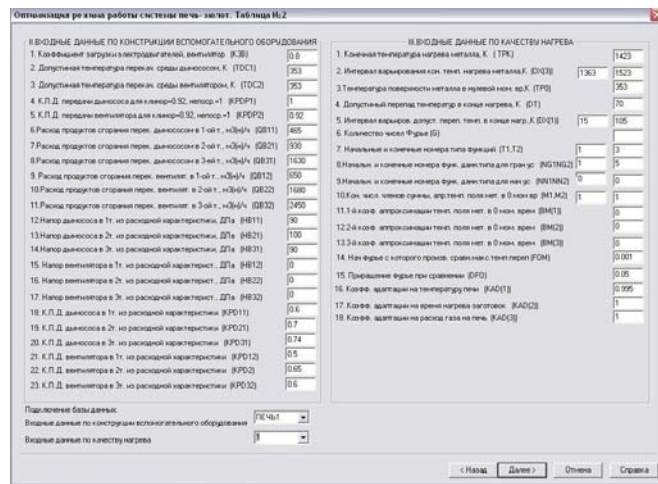


Рис. 6. Выбор теплофизических и физических свойств металла, конструкции молота и характеристик нагреваемых заготовок

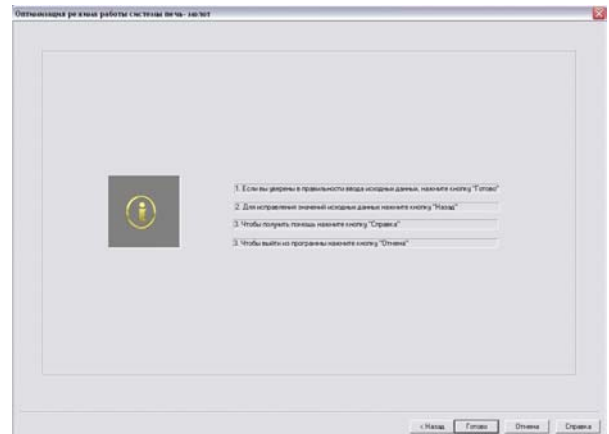


Рис. 9. Запуск программы на расчет

В следующем окне выбираются исходные данные по характеристикам теплоносителей и окружающей среде, а также по характеристикам кузнечного цеха и нажимается кнопка «Далее» (рис. 7).

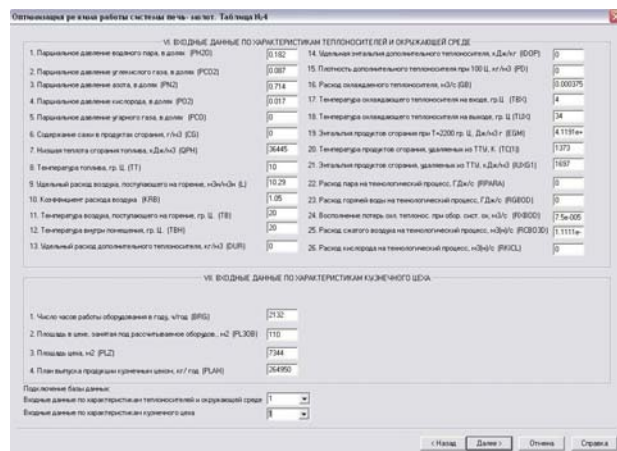


Рис. 7. Выбор исходных данных по характеристикам теплоносителей, окружающей среде и характеристикам кузнечного цеха

После нажатия на кнопку «Готово» программа «Оптимизация режима работы системы «печь-молот» выполняет расчет уточненного параметра стабилизации для выбранной заготовки в установке «печь1-молот1» и в появившемся окне выдает параметр стабилизации (рис. 10).

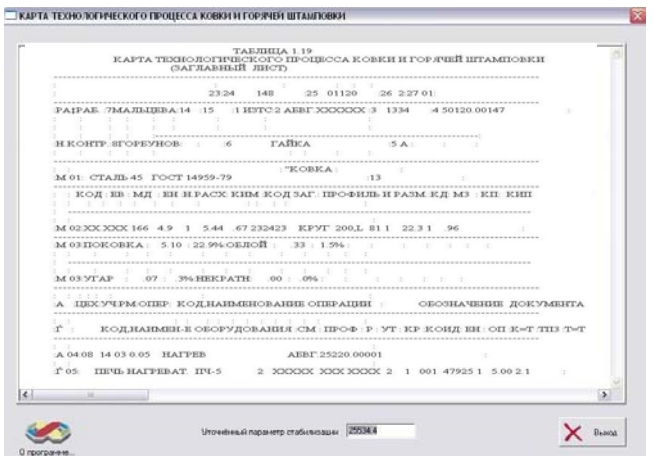


Рис. 10. Вывод уточненного параметра стабилизации

Таким образом рассчитывается уточненный параметр стабилизации для одной заготовки в системе «печь1–молот1». Для расчета уточненных параметров стабилизации всей номенклатуры заготовок нужно просчитать каждую заготовку отдельно во всех печах аналогично описанному выше примеру. После расчета всех имеющихся заготовок все результаты заносятся в таблицу (см. таблицу).

При расчете второго уровня оптимизации в качестве целевой функции используется минимум издержек кузнечного производства. Для решения задачи при проектировании оптимального выбора производительности установок при реконструкции цеха в качестве варьируемого параметра используется параметр стабилизации (4).

Второй уровень оптимизации состоит из двух шагов:

1. Корректировка приближенного распределения номенклатуры заготовок с учетом уточненных значений параметров стабилизации.

2. Перераспределение номенклатуры заготовок с учетом уточненных параметров стабилизации.

На первом шаге производится корректировка приближенного распределения номенклатуры заготовок. Для этого уточненные значения параметра стабилизации заготовки сравнивают-

ся с приближенными значениями параметра стабилизации этой же заготовки. Если эти два значения совпадают, то корректировка не происходит, а если значения не совпадают, то уточненный параметр стабилизации перемещается в колонку с приближенными параметрами K_i таким образом, чтобы все параметры стабилизации располагались в порядке возрастания. Такую процедуру необходимо провести с каждой из рассматриваемых заготовок. При корректировке некоторые заготовки могут переместиться в другую печь на основании уточненного значения параметра стабилизации (см. таблицу). В этом случае подставляется значение уточненного параметра стабилизации, соответствующее значению для этой печи.

На втором этапе производится перераспределение всей номенклатуры заготовок по уточненным параметрам стабилизации. Чтобы распределить заготовки по печам необходимо подготовить текстовый файл, в который заносятся исходные данные, необходимые для распределения заготовок между установками. К исходным данным для распределения номенклатуры заготовок относятся:

Значения уточненных параметров стабилизации для некоторых заготовок

№ печи	№ заготовки	Параметр стабилизации	стали	Уточненные параметры стабилизации		
				Печь 1	Печь 2	Печь 3
Печь 1	7401701013	66,4	40X	-	57358,7	106242
	74017011	101	45	20183,1	-	-
	7401701015	116	40X	-	35776,1	-
	7401701000	318	40X	-	44757,4	-
	740170100	349	45	21389,1	-	-
	101402	388	40X	41981,1	-	-
	740170060	698	20X	26031	-	-
	6151703401	2150	65Г	-	52929,3	77498,7
	794070102	2220	40X	19754,6	-	-
	7401701000	3470	40X	-	44757,4	-
	206417	43000	40X	32197	58349,1	109418
	539501	46700	20X	19063,6	37438,3	-
	231405	49100	20X	33403,4	34838,8	-
	423403	78600	38X2МЮА	27196,3	34180,4	-
	402403	95900	65Г	23625,2	33239,2	64637,2
	539410	138000	40X	30067	31995,7	-
	63147037	157000	20X	27725,1	-	68913,7
	503414	170000	65Г	21818,1	29593,8	63810
	120403	172000	65Г	-	51589,9	89361,4
	401415	174000	20X	23605	40295,9	83241
	401412	181000	20X	33552,9	42553,4	72170,5
	615170340	266000	65Г	26532,6	52929,3	77498,7
	1452401	287000	38X2МЮА	-	47343,7	84341,8
	14534012	446000	38X2МЮА	-	47343,7	84341,8
	316402	1770000	20X	20342,7	-	81988,6
	Печь 2	O219411	21100000	45	18132,6	-
104401		22300000	40X	36726	36726	-
O370501		45600000	45	35335,1	-	-
O312410		57800000	20X	28149	28149	-
O512421		60100000	40X	-	-	98859,5
570401		60400000	20X	-	39769,1	-
O104501		83800000	45	22941,4	-	-
O512430		84700000	20X	22524	56225,2	90439,4
Печь 3	O512415	113000000	45	-	34025,7	-
	O770402	114000000	45	-	-	61507,9
	O205404	352000000	20X	-	-	85341,7

- 1) допустимое относительное расхождение элементов массивов (0,1);
- 2) количество типоразмеров заготовок (максимум 1000);
- 3) количество установок (максимум 10);
- 4) заводские номера заготовок;
- 5) откорректированные значения параметров стабилизации.

После того как все параметры будут занесены в текстовый документ, производится расчет. Результаты расчета программа записывает в текстовый файл. В этом текстовом файле находится перераспределенная номенклатура заготовок. Результат распределения номенклатуры заготовок необходимо занести в таблицу. В таблице представлены некоторые результаты расчета математической модели двухуровневой оптимизации. В первом столбце номенклатура заготовок разбита по трем печам по приближенному параметру стабилизации, рассчитанному в программе по усредненным значениям параметров стабилизации, приведенным в третьем столбце, где представлены типоразмеры заготовок, перераспределенные по усредненному параметру стабилизации. Во втором столбце приведены заводские номера заготовок. Четвертый – содержит марки сталей. Пятый, шестой и седьмой столбцы содержат данные расчета уточненного параметра стабилизации по трем печам (печь1, печь2, печь3). Если значения параметра стабилизации отсутствуют, это значит, что данную заготовку в этой печи нагревать нежелательно.

Таким образом, в таблице приведены значения уточненных параметров стабилизации работы модели кузнечно-штамповочного производства с учетом двухуровневой оптимизации работы производства на основе расчета уточненного распределения нагрева заготовок по трем печам. Уточненное распределение позволило выявить, что некоторые заготовки, которые при приближенном распределении должны были обрабатываться в установках 2 и 3, с учетом двухуровневой оптимизации переместились в

печь 1. Следовательно, производительность установок 2 и 3 должна быть ниже ранее принятой производительности печей, которая была определена предварительно по усредненным параметрам стабилизации.

Заключение

Предложенный алгоритм математической модели двухуровневой оптимизации позволит решать ряд задач для действующих кузнечно-штамповочных производств:

- проводить тренинг и подбор персонала для работы на производстве;
- управлять производством;
- прогнозировать работу производства на заданный период времени с учетом различных технологических и производственных ограничений;
- разрабатывать научно-обоснованные режимно-технологические карты нагрева заготовок;
- разрабатывать научно-обоснованные нормы расхода топлива и электроэнергии на установку «печь–молот».

Список литературы

1. Бровкин Л.А., Крылова Л.С., Горбунов В.А. Совершенствование организации работы нагревательных печей в мелкосерийном и единичном производстве // Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – № 9. – С. 27–28.
2. Горбунов В.А., Крылова Л.С., Колибаба О.Б. Математическая модель для оптимизации режимов работы и определения технически обоснованных норм потребления энергии в установке нагревательная печь–молот // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1996. – № 1. – С. 39–43.
3. Кавадеров А.В., Самойлович Ю.А. Нагрев «тонких» тел одновременно излучением и конвекцией // Инж.-физич. журнал. – 1959. – №7. – С. 110–113.
4. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. – М.: Металлургиздат, 1962. – 567 с.
5. **Определение** производительности нагревательных печей при проектировании теплотехнологического оборудования единичного и мелкосерийного кузнечного производства / Л.А. Бровкин, В.А. Горбунов, Л.С. Крылова, Н.П. Воронко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1993. – № 12. – С. 23–24.

Горбунов Владимир Александрович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
e-mail: zamdekana@iff.ispu.ru