УДК 519.876

С.Я. Фомин

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

РАЗРАБОТКА ДИАЛОГОВОЙ ГИБКОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМ МНОГООПЕРАЦИОННЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ. СООБЩЕНИЕ 1

Аннотация. В сообщении рассмотрен ансамбль моделей построения технологических маршрутов изготовления труб способом холодной деформации. Разнообразные сочетания способов холодной прокатки и волочения при построении маршрутов позволяют оперативному персоналу гибко реагировать на разрешение возникающих конфликтных ситуаций в ходе производственного процесса. С помощью метода динамического программирования реализована процедура построения множества субоптимальных альтернативных вариантов маршрутов, обеспечивающих гибкость выбора приемлемых оперативных решений.

Ключевые слова: оперативное управление, конфликтные ситуации, технологический маршрут, холодная прокатка, волочение, очаг деформации, динамическое программирование, критерий оптимальности, математическая модель.

OPERATING DATA PROCESSING CONSOLE SYSTEM AUTOMATED COMMAND PROCESSOR DEVELOPMENT FOR LARGE-SCALE OPERATION PRODUCTION CONTROL. REPORT 1

Abstract. Ensemble of processing route's plotting of pipes' manufacture by the cold straining method is described in report 1. Various combinations of cold rolling and wire drawing when processing route's plotting allow efficient staff to react flexibly when solving disoutable matters during the manufacturing process. The dynamic programming method allowed to implement the procedure of constructing various suboptimal alternative routes options which ensure a flexible choice of acceptable operational solutions.

Keywords: operative administration, disputable matters, processing route, cold rolling, wire drawing, deformation spot, dynamic programming, optimization, symbolic model.

Изложенная в работе [1] структура инструментального комплекса автоматизированных средств поддержки выбора оперативных решений ориентирована на производство электросварных труб. Управленческие решения генерируются способом элементарных модификаций с соответствующими технологическими маршрутами (ТМ).

В отличие от указанного производства изготовление холоднодеформированных труб (ХДТ) представляет собой весьма сложный многостадийный процесс сочетания основных и вспомогательных операций. Сложность определяется большой размерностью портфеля заказов ХДТ (тысячи маркоразмеров), многообразием вариантов выбора способов и режимов деформаций по проходам ТМ и назначений соответствующих вспомогательный операций с учетом комплекса разнообразных факторов: по конструктивным параметрам очагов деформаций, рациональному использованию ресурса пластичности деформируемого металла, качеству наружной и внутренней поверхности труб, прочности рабочего инструмента, уровней оценок технико-экономических характеристик (энергозатраты, расход металла и др.) по каждому возможному варианту ТМ.

Включение в ТМ конкретных операций при формировании оперативных решений зависит не только от указанных факторов. На выбор структуры ТМ могут влиять и такие ситуативные условия, как текущий дефицит каких-либо агрегатов, препятствующий реализации ТМ, включающих эти агрегаты. Так, при возникновении дефицита волочильных станов требуемого тягового усилия приходится использовать ТМ с применением станов холодной прокатки труб (ХПТ), что может привести к существенному росту технологических затрат. Однако в условиях вынужденного ситуативного отклонения от использования предпочтительных ТМ следует выбирать наилучшие ТМ в смысле принятых оценок, удовлетворяющие ситуативным условиям при минимальном «ухудшении» оптимальных оценок.

Таким образом, характер процесса производства ХДТ предполагает наличие гибкой системы оперативного управления, позволяющей эффективно реализовать разнообразные возможности этой «гибкости» в условиях конкретных производственных ситуаций. Однако в реальной практике выбор управляющих решений осуществляется оперативным персоналом в режиме реального времени без глубокого системного

рассмотрения множества вышеуказанных факторов. При этом неизбежно снижение эффективности производственного процесса. Гибкость системы управления в значительной степени определяется уровнем компетентности, прогностических способностей и даже интуицией – человеческим фактором конкретных оперативных лиц, принимающих решения (ЛПР). Очевидно, для совершенствования системы выработки оперативных решений необходимо создавать эффективные инструментальные средства, адекватные специфике данной проблемы.

Процесс производства ХДТ строится на основе комбинаций способов холодной деформации, что определяет вариативность технологических схем и возможность выбора предпочтительных ТМ. Построение оптимальных ТМ изготовления ХДТ реализовано с помощью рекуррентной процедуры метода динамического программирования (ДП) [2]. Специфика процедуры метода ДП содержит два основных этапа (рис. 1): «обратный ход» – построение множества субоптимальных (альтернативных) ТМ и «прямой ход» – выбор из множества субоптимальных ТМ оптимального варианта, доставляющего экстремум принятому критерию оптимальности.

Обратный ход процедуры ДП ведется от определенного конечного (целевого) состояния оптимизируемого процесса. Однако в случае решения задачи распределения суммарных деформаций при построении ТМ изготовления ХДТ реализовать корректно обратный ход таким образом нельзя, поскольку этот процесс не является марковским, так как механические свойства трубы на завершающем проходе каждого альтернативного субоптимального ТМ определяются его содержанием (конкретное распределение ресурса пластичности по проходам ТМ, назначение операций промежуточного отжига и др.). Если же принять условно в качестве конечного состояния ТМ исходную трубу-заготовку, все механические свойства которой определены, то обратный ход достаточно корректно реализуется в направлении от трубы-заготовки к трубе конечного размера (см. рис. 1) в соответствии с рекуррентным уравнением Беллмана [2]:

$$F^*(\bar{x}_{i-1}) = extr\left[f_{i-1}\left(\bar{x}_{i-1}, \bar{u}_i^*\right) + F^*(\bar{x}_i)\right],\ \bar{u}_i^* \in M(\bar{u}_i), \quad (1)$$

где $F^*(\bar{x}_{i-1})$ – результирующее оптимальное значение критерия F, которое может быть достигнуто за число оставшихся стадий процесса, начиная с состояния $\bar{x}_{i-1}$, если следовать принципу оптимальности (знак *); экстремум достигается выбором оптимального управления $\bar{u}_i^*$ из множества возможных управлений $M(\bar{u}_i)$, переводящих систему из состояния $\bar{x}_{i-1}$ в состояние $\bar{x}_i$; $f_{i-1}\left(\bar{x}_{i-1}, \bar{u}_i^*\right)$ – приращение критерия F при переходе системы из состояния $\bar{x}_{i-1}$ в состояние $\bar{x}_i$ при оптимальном выборе управления $\bar{u}_i^*$; $F^*(\bar{x}_i)$ – результирующее оптимальное значение критерия F, полученное при прохождении оставшихся стадий процесса, начиная с состояния $\bar{x}_i$.

Построенные в процессе обратного хода субоптимальные ТМ по каждому типоразмеру являются первичной базой свода ТМ, которая используется на завершающей стадии диалоговой процедуры многокритериального выбора оперативных решений (планграфиков и т.п.) при выполнении конкретных заданий производственной программы с учетом разнообразных ситуативных ограничений: по производственным

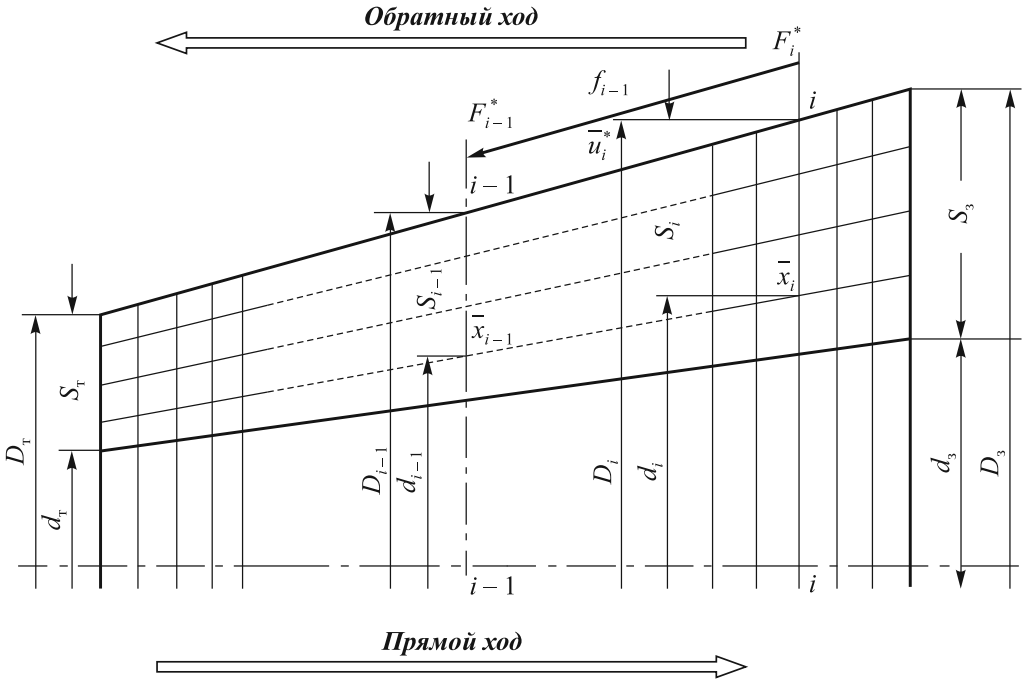

Рис. 1. Пояснение к схеме построения технологического маршрута

мощностям, наличию заготовки, рабочего инструмента, состоянию незавершенного производства и т.п. Множество субоптимальных вариантов ТМ позволяет эффективно использовать наиболее близкие по оценкам принятых критериев маршруты взамен строго оптимальных ТМ, которые по каким-либо условиям не могут быть реализованы на текущем интервале производственного процесса. Указанное обстоятельство является существенным фактором повышения технологической гибкости производства ХДТ [3].

При выполнении обратного хода ДП выстраивается сетка-«трубка» (см. рис. 1), внутри которой реализуется «проводка» структуры каждого возможного ТМ. Наружный диаметр трубы от трубы-заготовки ($D_з$) изменяется до трубы конечного размера ($D_т$) с постоянным шагом (например, с шагом 1 мм). Толщина стенки трубы изменяется в диапазоне $S_з$ – $S_т$ с необходимой точностью на каждом i-ом сечении «трубки» как разница $S_i = \frac{1}{2}\left(D_i - d_i\right)$. Шаг изменения стенки трубы уменьшается по мере приближения к готовому размеру, что соответствует реальному требованию повышения точности толщины стенки при деформации ее в направлении к готовому размеру.

Содержательное различие генерируемых ТМ заключается в качественном и количественном разнообразии структур субоптимальных ТМ. Качественное различие состоит в том, что для изготовления трубы заданного типоразмера из одной заготовки используются, в общем случае, различные комбинации способов деформации. Так, например, для изготовления трубы общего назначения из стали 20 размером 30×2,0 мм из горячекатаной заготовки размером 57×4,0 мм применяются следующие ТМ различной качественной структуры:

Маршрут № 1:

57×4,0 мм – заготовка: химическая обработка;

30×2,0 мм – готовая труба: прокатка на стане ХПТ-55.

Маршрут № 2:

57×4,0 мм – заготовка: химическая обработка, закатка головок;

48×3,3 мм – волочение на короткой оправке на 20-т стане, отжиг, порезка головок, закатка головок, химическая обработка;

39×2,4 мм – волочение на короткой оправке на 20-т стане, отжиг, порезка пополам, подбивка и закатка новых головок, химическая обработка;

30×2,0 мм – готовая труба: волочение на короткой оправке на 20-т стане, порезка головок.

При этом технологические затраты трехпроходного маршрута № 2 существенно ниже затрат однопроходного маршрута № 1. Они составляют порядка 65 % от технологических затрат маршрута № 1, единственный проход которого выполняется на стане ХПТ-55. При этом расходный коэффициент металла составляет соответственно по маршруту № 1 – 1,03, по маршруту № 2 – 1,15.

Количественное разнообразие ТМ заключается в том, что структурно однородные альтернативные маршруты различаются долей участия способов деформации и соответствующих вспомогательных операций. Рассмотрим следующие ТМ изготовления труб размером 18×2,0 мм из заготовки 57×4,0 мм:

Маршрут № 3:

57×4,0 мм – заготовка: химическая обработка;

25×1,9 мм – прокатка на стане ХПТ-55 (заготовка стенки трубы), отжиг, химическая обработка, закатка головок;

18×2,0 мм – готовая труба: волочение без оправки на 10-т стане.

Маршрут № 4:

57×4,0 мм – заготовка: химическая обработка;

32×1,85 мм – прокатка на стане ХПТ-55 (заготовка стенки трубы), отжиг, химическая обработка, закатка головок;

24×1,9 мм – волочение без оправки на 10-т стане, отжиг, порезка головок, порезка пополам, закатка головок;

18×2,0 мм – готовая труба: волочение без оправки на 10-т стане.

Эти маршруты однородны по структуре: заготовка стенки трубы осуществляется на стане ХПТ-55, доводка диаметра и стенки до готового размера – безоправочным волочением на 10-т стане. Количественное различие маршрутов состоит в том, что в суммарной деформации доля холодной прокатки в маршруте № 3 больше, чем в маршруте № 4. В маршруте № 4 для последующей реализации безоправочного волочения потребовалось два прохода, в маршруте № 3 – один проход. Маршруты № 3 и № 4 слабо различаются по технологическим затратам. С точки зрения экономии металла маршрут № 3 предпочтительнее. Однако, если в оперативной ситуации «узким местом» становятся станы ХПТ-55 (на них обычно осуществляется заготовка стенки – «подкат» для большой группы типоразмеров тонкостенных труб), то использование менее выгодного маршрута № 4 будет способствовать «расшивке» этого «узкого места», поскольку в нем меньше доля участия стана ХПТ-55.

В качестве критериев оптимальности (1) альтернативных вариантов ТМ введены следующие.

- Удельные технологические затраты изготовления труб. При необходимости из данного критерия в качестве самостоятельных могут быть выделены другие критерии, например, удельные затраты электроэнергии и т.п.
- Суммарное время изготовления заданного количества труб (например, тысячи метров).
- Сквозной расходный коэффициент металла за маршрут.

Основой процедуры генерации ТМ является достаточно обозримое конечное множество качественно различимых структур ТМ, «собираемых» компетентными ЛПР путем некоторых комбинаций способов холодной

прокатки, волочения на короткой оправке (КО) и безоправочного волочения (БО).

Для «сборки» маршрута ЛПР располагает следующими наиболее распространенными структурами ТМ: ХПТ; КО; ХПТ – КО; ХПТ – БО; КО – БО; ХПТ – КО – БО; КО – ХПТ – БО.

Рассмотрим основные компоненты структуры ансамбля математических моделей, используемых ЛПР при «сборке» ТМ изготовления ХД труб, соответствующие способам деформации.

Безоправочное волочение

При определении возможности изготовления трубы размерами $D_т$, $S_т$ из трубы-заготовки размерами $D_з$, $S_з$, как показано на рис. 2, способом БО проверяется условие утолщения (утонения) стенки трубы.

Стенка трубы-заготовки $S_з$ для получения трубы размерами $D_т$, $S_т$ определяется с помощью выражения [4]:

$$S_з = \frac{S_т}{1 + A\dfrac{D_з - D_т}{D_з + D_т}\left[B + C\left(\dfrac{S_т}{D_з} + \dfrac{S_з}{D_т}\right)\right]}. \qquad (2)$$

Значения эмпирических констант A, B и C даны для случаев относительной разовой деформации $E = \dfrac{D_з - D_т}{D_з} \cdot 100\ \%$.

Для учета расхода ресурса пластичности металла на предшествующих проходах использована методика В.Л. Колмогорова, позволяющая определить допустимую степень деформации между отжигами до начала разрушения металла трубы [5]. Степень использования ресурса пластичности за один проход определяется выражением [4]:

$$\psi = \int_z^1 2\sqrt{2}\,\frac{\sqrt{1+3z^6}}{z\left(1+3z^3\right)}\,\frac{dz}{A + B\dfrac{1-3z^3}{\sqrt{3}\sqrt{1-3z^6}}} < 1, \qquad (3)$$

где $z = \dfrac{D_т}{D_з}$.

Значения для коэффициентов A и B для групп исследованных марок сталей приведены в работе [4]. Аппроксимируя уравнение (3), получаем выражение:

$$\psi = \left(1 - \frac{D_т}{D_з}\right)\left(a_1 + a_2\frac{D_т}{D_з} + a_3\frac{D_т^2}{D_з^2} + \ldots\right) < 1, \qquad (4)$$

где a_1, a_2, a_3 – коэффициенты, зависящие от марки стали (приведены в работе [6]).

Необходимость термической обработки на предыдущем размере (проходе) определяется из условия:

$$\psi + \psi_\Sigma < 1, \qquad (5)$$

где ψ_Σ – степень использования ресурса пластичности в результате деформаций трубы на предыдущих проходах.

Величина допустимой разовой деформации ограничивается двумя факторами: прочностью сечения выходящего конца трубы (или головки) и устойчивостью контура трубы в очаге деформации. При волочении тонкостенных и особо тонкостенных труб ($1{,}8\ \% < S_т/D_т \cdot 100\ \% < 4\ \%$) проверяется условие устойчивости контура трубы, согласно которому относительная деформация за проход не должна достигать критической величины:

$$E_{кр} = 2{,}8 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{S_т}{D_т}\right)^2,\ \%, \qquad (6)$$

При определении допустимого напряжения волочения использована зависимость

$$\sigma_S^{\partial} = \frac{\sigma_т}{K_{зап}}, \qquad (7)$$

где $\sigma_т$ – предел текучести металла трубы; $K_{зап}$ – коэффициент запаса прочности ($K_{зап}$ = 1,1 – 1,2).

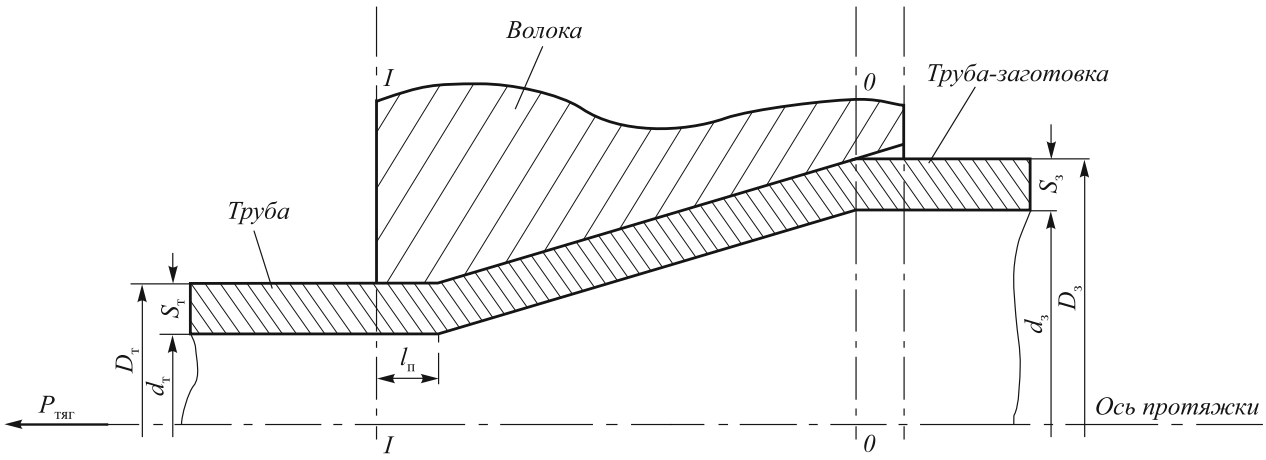

Рис. 2. Схема очага деформации при безоправочном волочении труб

Зависимость (7) дает величину σ_S^{∂} из условий прочности наклепанной трубы. Более жестким ограничением является определение σ_S^{∂} из условия прочности головки трубы:

$$\sigma_S^{\partial} = \frac{\sigma_{\text{т}}^{3}}{K_{\text{зап}}}\mu, \qquad (8)$$

где μ – коэффициент вытяжки; $\sigma_{\text{т}}^{3}$ – предел текучести металла трубы-заготовки.

Необходимое качество внутренней поверхности трубы существенно зависит от величины диаметра трубы-заготовки, по которому заготовлена стенка. Чем большую величину редуцирования получает труба с момента заготовки стенки в процессе последующих безоправочных проходов, тем ниже качество ее внутренней поверхности. Поэтому при моделировании процесса безоправочного волочения следует ограничиваться величиной максимально допустимого диаметра трубы-заготовки под последующее безоправочное волочение:

$$D_{\text{з}} \le D_{\text{БО}}^{\max}. \qquad (9)$$

Основным критерием, определяющим прочностные возможности волочильного стана данного типоразмера, является проверка условия по тяговому усилию стана $P_{\text{тяг}}$:

$$Q < P_{\text{тяг}}. \qquad (10)$$

Усилие волочения:

$$Q = F_{\text{т}}K, \qquad (11)$$

где $F_{\text{т}}$ – площадь сечения трубы.

Напряжение волочения определено по эмпирической формуле [6]:

$$K = 0{,}105\left(1 - \sin\frac{a}{2}\right)(1+f)\sigma_{\text{вср}}\sqrt{E}, \qquad (12)$$

где $\sigma_{\text{вср}} = \dfrac{\sigma_{\text{в}}^{0} + \sigma_{\text{в}}^{1}}{2}$ – среднее значение предела прочности в очаге деформации.

Оправочное волочение

При конструировании геометрий очага деформации для способа волочения на короткой закрепленной оправке (рис. 3) в модель вводятся условия:

- обязательное уменьшение стенки трубы;
- обеспечение минимально возможного зазора, необходимого для введения оправки в трубу-заготовку.

Расчет степени использования ресурса пластичности за проход для зоны редуцирования $\psi_{\text{ред}}$ определяется по формуле (4), где вместо $D_{\text{т}}$ подставляется величина $\overline{D}$:

$$\overline{D} = D_{\text{т}} + 2(S_{\text{з}} - S_{\text{т}}). \qquad (13)$$

Для учета использования ресурса пластичности в зоне обжатия стенки использовано выражение [4]:

$$\psi_{\text{обж}} = \frac{2}{A+3B}\ln\frac{\dfrac{\overline{S}}{S_{\text{т}}}(A+3B) + 2B\left(1 - 3\sqrt{\dfrac{D_{\text{т}}}{\overline{D}}}\right)}{A+3B+2B\left(1-3\sqrt{\dfrac{D_{\text{т}}}{\overline{D}}}\right)}. \qquad (14)$$

Значения коэффициентов A и B те же, что и для формулы (3). Величина $\overline{S}$ вычисляется по формуле (2), соответственно преобразованной к виду:

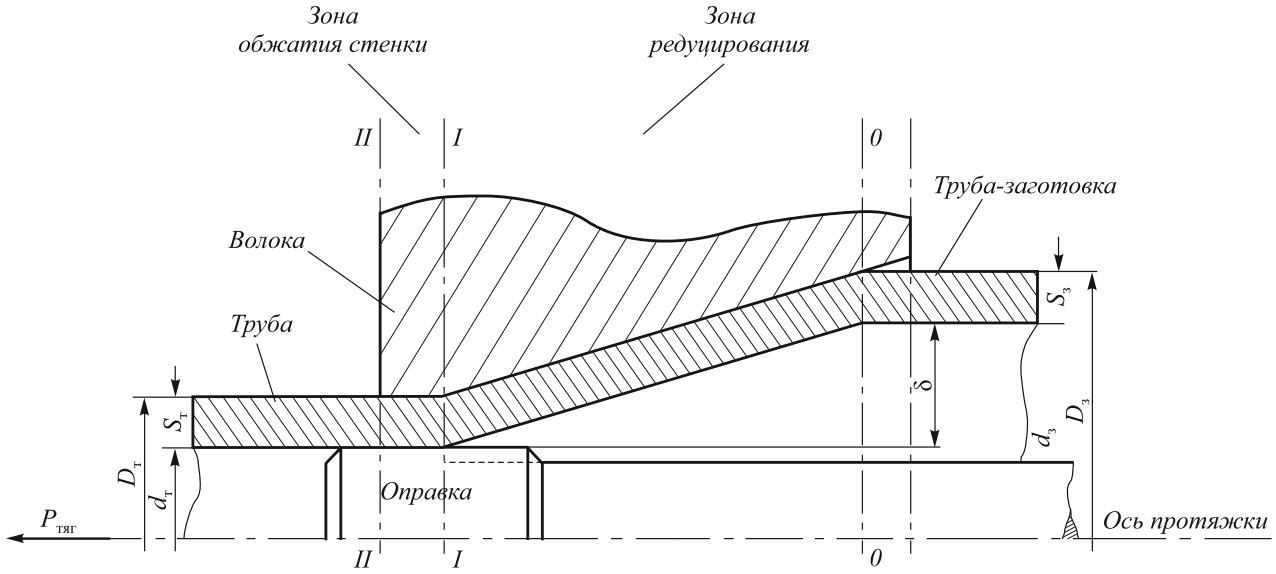

Рис. 3. Схема очага деформации при волочении труб на короткой оправке

$$\bar{S} = \frac{1 + A \cdot B \dfrac{D_з - D_т}{D_з + D_т}}{\dfrac{1}{S_з} - A \cdot C \dfrac{D_з - D_т}{D_з \cdot D_т}}. \qquad (15)$$

Ограничение по использованию ресурса пластичности за оправочный проход:

$$\psi_{ред} + \psi_{обж} < 1. \qquad (16)$$

С помощью условия (16) выясняется необходимость отжига труб на предыдущем размере ($D_з$, $S_з$). Для расчета возможной разовой деформации использована зависимость, определяющая допустимый коэффициент вытяжки из условия прочности выходящего конца трубы.

Допустимый коэффициент вытяжки в зоне обжатия стенки равен:

$$\mu_{з0} \le \sqrt[a]{\frac{1{,}1\sigma_{тс}^{I\,II}\dfrac{a+1}{a} - K_{\delta}^{0I}}{1{,}1\sigma_{тс}^{I\,II}\dfrac{a+1}{a} - \sigma_s^{\partial}}}, \qquad (17)$$

где

$$a = \frac{Af}{\mathrm{tg}a}; \qquad (18)$$

$$A = 1 + \frac{d_т \cos a}{d_т + S_з + S_т}; \qquad (19)$$

$\sigma_{тс}$ – средняя величина предела текучести.

Напряжение волочения в конце участка редуцирования:

$$K^{0I} = 1{,}15\frac{a+1}{a}\left[1 - \left(\frac{\bar{D} - S_з}{D_з - S_з}\right)^a\right] + \sigma_{упр}\left(\frac{\bar{D} - S_з}{D_з - S_з}\right)^a. \qquad (20)$$

Допустимый коэффициент вытяжки за проход:

$$\mu^{\Sigma} = \mu_{ред}\,\mu_{з0}. \qquad (21)$$

Минимально возможный внутренний диаметр трубы ограничивается прочностью болта, испытывающего растягивающее усилие (в модели использованы данные производственной практики).

Волочение труб на подвижной плавающей оправке используется преимущественно в производстве труб из цветных металлов (бухтовое волочение). В данной модели не рассматривается.

Для проверки прочности стана по тяговому усилию использована эмпирическая формула определения напряжения волочения [6]:

$$K = \sigma_{вср}\ln\mu\left(1 + \frac{f}{\sin\alpha\cos\alpha} + \frac{f}{\mathrm{tg}\alpha}\right), \qquad (22)$$

где α – угол конусности волоки; f – коэффициент трения в очаге деформации; $\sigma_{вср}$ – среднее значение предела прочности металла трубы в очаге деформации; μ – коэффициент вытяжки.

Холодная прокатка (рис. 4)

Конструктивные параметры очага деформации при прокатке на станах ХПТ ограничиваются, в первую очередь, диапазоном геометрических размеров труб, изготовляемых на конкретном стане и размеров используемой заготовки.

При моделировании способа холодной прокатки использована наиболее распространенная калибровка очага деформации – калибровка МИСиС, реализующая падающий режим обжатий [8].

Технологически необходимый зазор δ между цилиндром оправки и трубой-заготовкой учитывается ограничением:

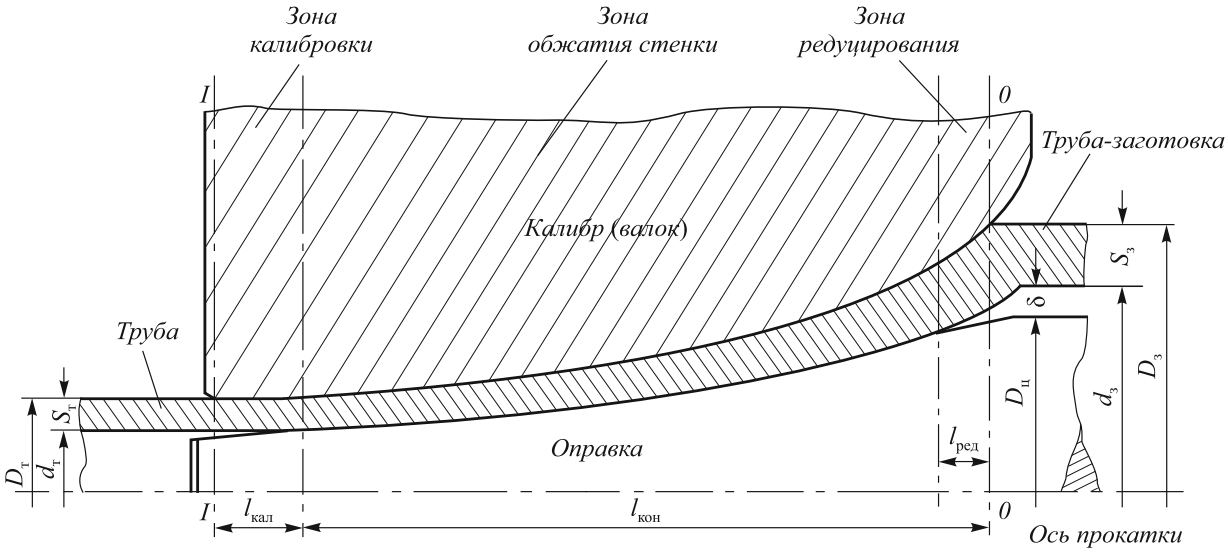

Рис. 4. Схема очага деформации при прокатке труб на стане холодной прокатки

$$d_з \geq D_ц + \delta, \quad (23)$$

где $D_ц$ – диаметр цилиндрической части оправки.

$$D_ц = d_т + l_{кон} 2\text{tg}\alpha. \quad (24)$$

В модели использованы рекомендации по выбору значений $l_{кон}$ и 2tgα (конусность оправки) для станов ХПТ, отражающие опыт работы передовых предприятий.

При деформации трубы со значительным редуцированием и слабым обжатием по стенке на внутренней поверхности трубы образуются складки, которые не раскатываются при дальнейшем утонении стенки.

Для обеспечения необходимого качества внутренней поверхности трубы в модели учтена следующая рекомендация [8]: если $\Delta S_{ред}$ = (0,4 – 0,7) мм, то относительное обжатие по стенке $\Delta\% \geq (40 - 50)$ %.

Утолщение стенки в процессе редуцирования:

$$\Delta S_{ред} = 0,75 S_з \frac{\Delta D_{ред}}{D_з}. \quad (25)$$

Величину редуцирования с достаточной точностью можно принять равной:

$$\Delta D_{ред} = d_з - D_ц. \quad (26)$$

Необходимым качеством наружной поверхности трубы является отсутствие «волнистости», которая определяется кратностью калибровки трубы в очаге деформации, максимально возможным выходом трубы за один двойной ход клети – $(m\mu)_{max}$.

В модели использованы значения $(m\mu)_{max}$, достигнутые на передовых предприятиях. Если прокатка ведется на готовый размер, то величину $(m\mu)_{max}$ следует уменьшить на коэффициент качества $K_{кач}$ (для труб общего назначения $K_{кач}$ = 1,1). Величина подачи m не может быть менее минимально возможной подачи для данного типоразмера стана ХПТ.

Проверка назначенного технологического режима $(m\mu)_{max}$, с точки зрения разрушения металла трубы, заключается в определении степени использования ресурса пластичности металла [9]:

$$\psi = \sqrt{\frac{2m(1-2\mu)}{3L_{обж}}} \frac{\alpha\beta\lambda_0}{\lambda_р^{вып}} < 1, \quad (27)$$

где α – коэффициент, учитывающий немонотонность деформации; $\lambda_р^{вып}$ – предельная степень деформации в области выпуска калибра; β – коэффициент, учитывающий долю деформации в области выпуска калибра; $L_{обж}$ – длина участка обжатия стенки трубы:

$$L_{обж} = L_{кон} - L_{ред}; \quad (28)$$

λ_0 – степень итоговой деформации сдвига.

Длина участка редуцирования равна:

$$L_{ред} = \frac{\Delta D_{ред}}{2\text{tg}\gamma_{ред} - 2\text{tg}a}, \quad (29)$$

где $2\text{tg}\gamma_{ред}$ – значение конусности зоны редуцирования.

$$\lambda_0 = 2\sqrt{\left(\ln\frac{S_т}{S_з}\right) + \ln\frac{S_т}{S_з}\ln\frac{D_т}{D_з} + \left(\ln\frac{D_т}{D_з}\right)^2}. \quad (30)$$

Значения α, β, $\lambda_р^{вып}$, $2\text{tg}\gamma_{ред}$ для ряда исследованных марок стали приведены в работе [9].

Если условие (27) не выполняется, то путем последовательного уменьшения величины m достигается удовлетворение условия. Полученный технологический режим $m\mu$ является исходным для прочностной проверки стана по допустимому давлению металла на валки [8]:

$$m\mu \leq \frac{P_\Sigma^2 l_{кон}}{2,02\sigma_{в50\%}^2 (D_з - D_т)^2 (S_з - S_т)\rho_{ср}}, \quad (31)$$

где P_Σ – максимально допустимое давление металла на валки для стана данного типоразмера;

$$\rho_{ср} = \rho_0 - 0,25(D_з - D_т), \quad (32)$$

где ρ_0 – катающий радиус валка стана ХПТ рассматриваемого типа.

Построение диалоговой процедуры синтеза технологических схем завершается введением в ансамбль рассмотренных моделей блока зависимостей, связывающих операции деформаций с выполнением необходимых вспомогательных операций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фомин С.Я. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 11. С. 64 – 69.
2. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. –М.: Наука, 1965.
3. Соломенцев Ю.М. Технологические основы гибких производственных систем: Учеб. пособие. –М.: Высшая школа, 2000.
4. Уральский В.И., Колмогоров В.Л., Козлов Г.Д. Определение максимальных деформаций при волочении // Интенсификация процессов производства холоднодеформированных труб. – Свердловск: Среднеуральское книжное издательство, 1969. С. 16 – 22.
5. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 230 с.
6. Ериклинцев В.В., Фомин С.Я. Выбор экономичных технологических маршрутов производства холоднодеформированных труб – М.: Ин-т «Черметинформация», 1972. Сер. 23. Вып. 2. – 40 с.
7. Касьян В.Х. Выбор рациональных технологических схем производства холоднодеформированных труб из углеродистых сталей и использованием ЭВМ. Дисс.…канд. техн. наук – Днепропетровск: ДМетИ, 1967. – 148 с.

8. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. – М.: Металлургиздат, 1963. – 418 с.
9. Плахотин В.С., Колмогоров В.Л., Миронов В.Г. Определение максимальных деформаций при холодной прокатке труб. // Интенсификация процессов производства холоднодеформированных труб. – Свердловск: Среднеуральское книжное издательство, 1969. С. 23 – 31.

© 2013 г. *С.Я. Фомин*
Поступила 18 декабря 2012 г.

УДК 669.041

А.А. Ансимов, Э.Э. Меркер, Д.А. Харламов

Старооскольский технологический институт

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЖИГОВЫХ ПЕЧАХ

Аннотация. В работе представлены данные по разработке и использованию компьютерной системы управления режимом сжигания топлива на вращающихся печах обжига известняка. Анализ опытных данных свидетельствует об эффективности и надежности применения этой системы для оптимизации режима сжигания топлива во вращающихся печах, что позволяет улучшить технико-экономические и энерго-экологические показатели производства извести.

Ключевые слова: обжиговая печь, управление, известь, коэффициент расхода воздуха.

MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM DEVELOPMENT TO ROTARY ROASTING FURNACE FUEL COMBUSTION PROCESS CONTROL

Abstract. In work are submitted data on development and use of a computer control system by a mode of burning of fuel on rotating furnaces of roasting limestone. The analysis of skilled data testifies to efficiency and reliability of use of this system for optimization of a mode of burning fuel in rotating furnaces that allows to improve technical and economic and power-ecological indicators of lime production.

Keywords: rotating furnace, management, lime, coefficient of air consumption.

Оптимизация режима сжигания топлива во вращающейся печи обжига известняка [1] связана с количеством воздуха, подводимого в зону горения, и является одним из главных факторов [2], определяющих снижение удельного расхода тепла на процесс обжига, повышение производительности агрегата и уменьшение количества вредных выбросов в атмосферу при условии обеспечения требуемых показателей качества извести, необходимой для производства [3] высококачественных марок сталей.

Анализ результатов исследования в цехе обжига извести Оскольского электрометаллургического комбината по оценке эффективности производства извести [3, 4] на вращающихся обжиговых печах осуществляли по данным текущего контроля параметров теплового режима с отбором проб на химический анализ отходящих из агрегата газов и контролем коэффициента избытка воздуха [5, 6] по формуле

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{хим}} = \frac{1}{1 - 3,76\dfrac{\text{O}_2^{\partial} - 0,5\left(\text{CO}^{\partial} + \text{H}_2^{\partial}\right)}{\text{N}_2}}, \qquad (1)$$

где $\text{N}_2^{\partial} = 100 - (\text{CO}_2^{\partial} + \text{O}_2^{\partial} + \text{H}_2^{\partial} + \text{CO}^{\partial})$; N_2^{∂}, CO_2^{∂}, O_2^{∂}, CO^{∂}, H_2^{∂} – составляющие отходящих из печи дымовых газов при отборе проб на входе в пылевую камеру [3, 4].

Конструкция однопроводной горелки типа ГРЦ для сжигания природного газа (до 3500 м^3/ч) в печи с регулируемой длиной факела и внешним подсосом нагретого воздуха до 450 – 500 °С, поступаемого из холодильника в зону горения печи [3, 4], позволяет интенсифицировать сжигание топлива с обеспечением средней температуры факела до 1600 ± 50 °С и определением требуемой [1, 3, 7] производительности агрегата:

$$G = \alpha_{\Sigma}\left(\frac{T_{\text{ф}} - T_{\text{м}}}{q_{\text{т}}}\right)F, \qquad (2)$$

где α_{Σ} – средний коэффициент теплоотдачи, кДж/(м^2·с); $T_{\text{ф}}$ и $T_{\text{м}}$ – средние значения температур газового факела и известняка в зоне обжига печи соответственно, °С; $q_{\text{т}}$ – удельный расход теплоты на обжиг известняка, кДж/кг; F – поверхность контакта факела и известняка в зоне обжига печи, м^2.

Исследованиями установлено [1, 3, 4], что на производительность печи (G, т/ч), удельный расход теплоты ($q_{\text{т}}$, кДж/кг) и другие показатели (α_{Σ}, $T_{\text{ф}}$) существенное влияние оказывают условия сжигания топлива, конструкция горелки и, в особенности, коэффициент расхода воздуха ($\alpha_{\text{в}}^{\text{хим}}$), а также метод управления [4, 6, 7] тепловым режимом работы вращающейся печи.