

УДК 621.771.38

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ПРЕСС-ВАЛКОВОЙ ПРОШИВКИ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ

С.Р. Рахманов, к.т.н., доцент

Национальная металлургическая академия Украины (Днепропетровск, Украина)

Аннотация. Получены уточненные представления о напряженном состоянии металла (рабочей среды) в очаге деформации при реализации технологических процессов пресс-валковой прошивки трубной заготовки. Математическим моделированием установлено влияние формы образующей оправки и рабочих валков на характер формирования энергосиловых параметров очага деформации. Сформирован функционал и приведено решение оптимизационной задачи по определению рационального профиля образующей (калибровки) оправки.

Ключевые слова: пресс, валок, оправка, математическая модель, динамика, заготовка, очаг деформации, труба, функционал, оптимизация, профиль, калибровка.

E-MAIL: npfvostok@mail.ru

Анализ многочисленных литературных источников позволяет констатировать, что к настоящему времени фундаментальной теорией обработки металлов давлением, в частности теорией производства труб, накоплен значительный научный потенциал. Теория производства труб располагает математическими методами для повышения эффективности исследования процессов пластического формоизменения исходной трубной заготовки на соответствующих этапах проектирования и реализации технологических процессов. Проведенные многочисленные теоретические и экспериментальные исследования процессов производства бесшовных труб позволили установить определенное влияние основных параметров формоизменения (температуры металла, скорости, степени деформации и т.д.) на распределение контактных напряжений и параметров исходной трубной заготовки [1, 2].

В связи с этим актуальным является разработка новых и развитие существующих теоретических основ исследования, прогнозирования и оптимизации технологических процессов производства бесшовных труб.

Пути реализации аналогичных задач преимущественно базируются на методах теории оптимального управления многофакторными континуальными системами или системами с распределенными параметрами (динамического программирования, случайного поиска, поэтапной оптимизации и др.) [3].

Значительный интерес представляют попытки оптимизации технологических процессов производства горячекатаных труб по определяющим силовым параметрам на основе их комплексного аналитического или эмпирического исследования.

Более подробно остановимся на вопросе исследования динамики технологического процесса стана пресс-валковой прошивки трубопрокатной установки.

Необходимость анализа динамики процесса течения и всестороннего изучения особенности поведения

металла в очаге деформации стана пресс-валковой прошивки предопределило и поставило общеизвестные методы обработки металлов давлением перед неизбежностью использования достаточно разработанного математического аппарата базовой теории вязких сред (гидродинамическая аналогия). Учитывая, что температура металла в ходе реализации технологического процесса достаточно большая, то такой подход к данному процессу вполне оправдан. При этом рассматриваемый динамический процесс производства труб на стане пресс-валковой прошивки удобно моделировать на базе реологии вязкой несжимаемой среды с характерной гидродинамической моделью [4, 5, 8].

Предложение о применении аналогичной математической модели для исследования динамики технологического процесса прошивки трубной заготовки на прошивном стане трубопрокатной установки частично реализовано в работе [8].

Выбранная расчетная схема процесса пресс-валковой прошивки трубной заготовки представлена на рис. 1.

Реализация исходного технологического процесса пресс-валковой прошивки трубной заготовки осуществляется ее принудительной подачей в очаг деформации за счет взаимосвязанного одновременного поступательного движения пресс-штемпера и рабочих валков стана, которые вращаются с постоянной угловой скоростью ω (рис. 2).

При решении поставленной задачи следует предполагать, что течение металла в замкнутом пространстве очага деформации является условно стационарным и осесимметричным. Отметим, что при реализации процесса прошивки на калиброванных рабочих валках это условие, строго говоря, выполняется с некоторыми оговорками.

Далее исследования динамики процесса пресс-валковой прошивки заготовки проведем на основе одной из приближенной математической модели. Анализ

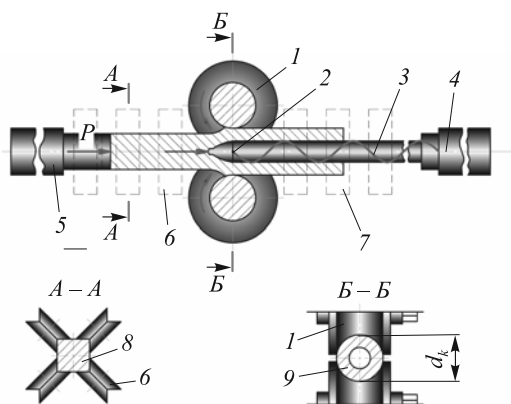


Рис. 1. Схема процесса пресс-валковой прошивки трубной заготовки:

1 – валковая клетка; 2 – оправка; 3 – стержень; 4 – упорно-регулирующий механизм; 5 – вталкиватель заготовки; 6 – роликовые проводки; 7 – центроваль стержня оправки и гильзы; 8 – заготовка; 9 – гильза (труба)

рассматриваемого процесса осуществляется на основе математической модели вязкой несжимаемой среды с известным коэффициентом «вязкости» μ , зависящим от температуры, механических свойств прошиваемого металла и т.д.

Выполним ряд упрощающих предположений. Будем считать, что площадь поперечного сечения очага деформации, в котором происходит одноосное течение металла, изменяется плавно. Следовательно, радиальными и окружными компонентами скорости по сравнению с осевой компонентой скорости v_x можно пренебречь.

Поскольку течение рабочей среды, моделирующей течение металла в очаге деформации, является условно осесимметричным, то для решения задачи воспользуемся уравнением Навье–Стокса в цилиндрической системе координат [6, 7]. В дальнейшем будем считать, что процесс пресс-валковой прошивки трубной заготовки происходит достаточно медленно, тогда инерционными составляющими (производной $\partial v_x / \partial t$) пренебрегаем. С учетом принятых допущений уравнения Навье–Стокса значительно упрощаются и принимают следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial r} = 0; & \frac{\partial p}{\partial \theta} = 0; \\ \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \right]; \end{cases} \quad (1)$$

здесь p – давление в очаге деформации; μ – вязкость рабочей среды (прошиваемого металла); v_x – соответствующая осевая компонента скорости в выбранной цилиндрической системе координат.

Откуда следует, что давление в очаге деформации является функцией только одной переменной x . Тогда в дальнейшем для исследования особенностей динамики процесса пресс-валковой прошивки трубной заготовки

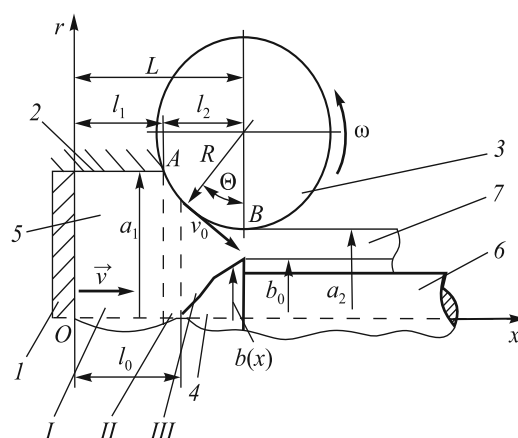


Рис. 2. Расчетная схема процесса пресс-валковой прошивки трубной заготовки:

1 – пресс-штемпель; 2 – направляющая проводка; 3 – валок; 4 – оправка; 5 – трубная заготовка; 6 – стержень оправки; 7 – гильза (труба)

будем использовать метод местных течений [5]. Характерно, что данный случай отличается от ранее рассмотренных аналогичных случаев наличием подвижного участка на рабочей поверхности инструмента AB , соответствующего зоне контакта металла с вращающимися рабочими валками.

Выдвигая допущение о медленном изменении площади поперечного сечения кольцевого канала очага деформации, занятого потоком прошиваемого металла, будем пренебрегать производной $\partial^2 v_x / \partial x^2$ по сравнению с другими слагаемыми в правой части уравнения (1). В результате принятых допущений и условий уравнение Навье–Стокса окончательно представим в виде

$$\frac{dp}{dx} = \mu \left[\frac{\partial^2 v_x(x, r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x(x, r)}{\partial r} \right]. \quad (2)$$

Из последнего следует, что осевая компонента скорости $v_x(x, r)$ зависит только от координат x и r . Полученное выражение фактически является преобразованным уравнением Пуазейля. Таким образом, рассматриваемая математическая модель динамики технологического процесса достаточно полно характеризует особенности течения металла в замкнутом калибре очага деформации.

Согласно данным работы [6], решение уравнения (2) по распределению скоростей течения металла в очаге деформации можно представить в общем виде:

$$v_x(x, r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} r^2 + A(x) \ln r + B(x). \quad (3)$$

Очевидно, что параметры интегрирования $A(x)$ и $B(x)$ не являются постоянными интегрирования. Они должны быть определены из условия взаимодействия потока металла с технологическими инструментами на внутренней и внешней границах очага деформации

(в том числе и на подвижном участке границы рабочих валков AB). Для этого область течения потока металла в очаге деформации разобьем на три участка I , II , III (рис. 2). На участке I (зона прессования) очага деформации имеем

$$v_x^I(x, r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r^2 - a_1^2); \quad (0 < x < l_1). \quad (4)$$

На участке II (зона редуцирования) очага деформации с учетом вращения рабочих валков находим

$$v_x^{II}(x, r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r^2 - a^2(x)) + v_{0x}; \quad (l_1 < x < l_0). \quad (5)$$

Для участка III (зона прошивки) очага деформации с учетом формы образующей рабочей поверхности оправки запишем

$$v_x^{III} = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left[r^2 - \frac{a^2(x) - b^2(x)}{\ln \frac{a(x)}{b(x)}} \ln \frac{r}{b(x)} - b^2(x) \right] + \omega_{0x} \frac{\ln \frac{r}{b(x)}}{\ln \frac{a(x)}{b(x)}}; \quad (l_0 < x < L). \quad (6)$$

Причем на участках II и III , в выбранной системе отсчета для рабочей поверхности вала (участок AB)

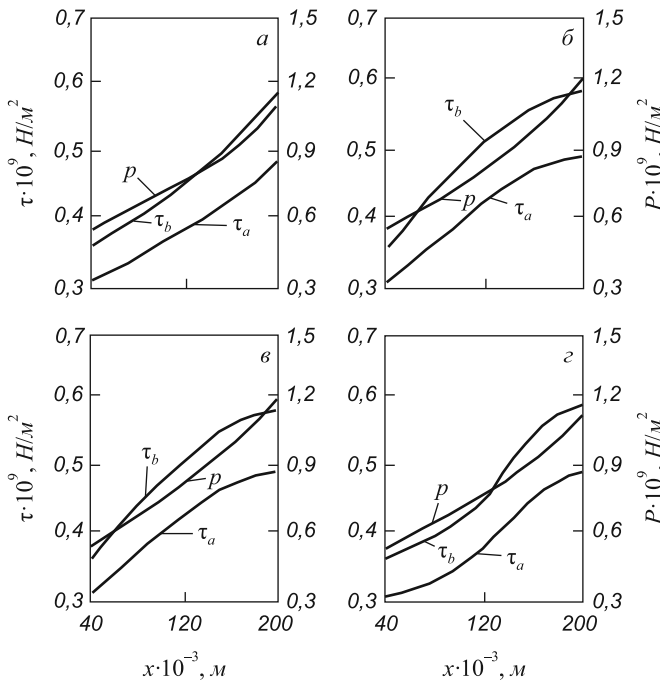


Рис. 3. Распределение давления p , касательных напряжений на валке τ_a и на оправке τ_b в очаге деформации в процессе пресс-валковой прошивки трубной заготовки с учетом калибровки оправки при $v_0 = 0,3$ м/с

радиус валка в меридиональном сечении калибра определяется в виде

$$a(x) = a_2 + R - \sqrt{R^2 - (x - L)^2}, \quad R = \frac{l_2^2 + (a_1 - a_2)^2}{2(a_1 - a_2)}. \quad (7)$$

Уравнение неразрывности потока рабочей среды в дальнейшем представим в виде интегрального закона сохранения расхода рабочей среды (металла) через замкнутый очаг деформации, ограниченный заданными границами недеформируемых технологических инструментов. Как правило, градиент давления dp/dx выражается через расход Q потока металла в очаге деформации, который, с одной стороны, равен

$$Q = \pi a_1^2 v, \quad (8)$$

а с другой, в общем случае определяется интегрально границами рассматриваемой области калибра:

$$2\pi \int_0^{a(x)} v_x(x, r) r dr = Q. \quad (9)$$

Подставим в последнее выражение формулы (4) – (6) для скорости течения потока рабочей среды и соответственно получим градиент давления dp/dx на выбранных участках очага деформации в виде

$$\frac{dp^I}{dx} = -\frac{8\mu}{\pi a_1^4}; \quad (10)$$

$$\frac{dp^{II}}{dx} = -\frac{8\mu}{\pi} \frac{Q - \pi a^2(x) v_{0x}}{a^4(x)}; \quad (11)$$

$$\frac{dp^{III}}{dx} = -\frac{8\mu}{\pi} \frac{Q - \pi a^2(x) v_{0x} \left[\frac{a(x) - \frac{a^2(x) - b^2(x)}{2a(x) \ln \frac{a(x)}{b(x)}} \right]}{a^4(x) - b^4(x) - \frac{[a^2(x) - b^2(x)]^2}{\ln \frac{a(x)}{b(x)}}}. \quad (12)$$

Из рис. 2 видно, что проекция вектора скорости \vec{v}_0 точки валка на ось x равна

$$v_{0x} = v_0 \cos \theta = \omega R \sqrt{1 - \left(\frac{L - x}{R} \right)^2}. \quad (13)$$

Выражения (10) – (12) позволяют определить давление на всех участках очага деформации с учетом ее геометрии (формы калибра). Если принять, что в самом узком месте калибра (при выходе гильзы из рабочих валков) давление равно атмосферному, то

для давления металла под вталкивателем заготовки запишем

$$p_0 = \frac{8\mu}{\pi} \frac{Q}{a_1^4} l_1 + \frac{8\mu}{\pi} \int_{l_1}^{l_0} \left[\frac{Q - \pi a^2(x) v_{0x}}{a^4(x)} dx \right] +$$

$$+ \frac{8\mu}{\pi} \int_{l_0}^L \left[\frac{Q - \pi a^2(x) v_{0x} \left[a(x) - \frac{a^2(x) - b^2(x)}{2a(x) \ln \frac{a(x)}{b(x)}} \right]}{a^4(x) - b^4(x) - \frac{[a^2(x) - b^2(x)]^2}{\ln \frac{a(x)}{b(x)}}} dx \right]. \quad (14)$$

Усилие прессования трубной заготовки с учетом выражения (14) определяется в виде

$$P = \pi a_1^2 p_0. \quad (15)$$

Теперь перейдем к определению напряжений трения на соответствующих поверхностях вращающихся рабочих валков и оправки. Согласно закону вязких трений Ньютона [6, 7], на рабочей поверхности оправки (участок III) имеем

$$\tau^{III}(r=b) = \mu \frac{\partial v(x, r)}{\partial r} =$$

$$= \frac{1}{4b(x)} \frac{\partial p}{\partial x} \left[2b(x) - \frac{a^2(x) - b^2(x)}{b(x) \ln \frac{a(x)}{b(x)}} \right] + \frac{\mu \omega_{0x}}{b(x) \ln \frac{a(x)}{b(x)}}. \quad (16)$$

Для рабочих поверхностей передней направляющей проводки стана и рабочего валка на данном участке соответственно запишем:

$$\tau^I[a(x)] = -\mu \frac{\partial v_x(x, r)}{\partial r} = -\frac{1}{2} \frac{dp}{dx} a(x); \quad (17)$$

на участке II

$$\tau^{II}[a(x)] = -\frac{1}{2} \frac{dp}{dx} a(x) = \frac{4\mu}{\pi a^3(x)} [Q - \pi a^2(x) v_{0x}]; \quad (18)$$

на участке III

$$\tau^{III}[a(x)] = -\frac{1}{4a(x)} \frac{\partial p^{III}}{\partial x} \times$$

$$\times \left[2a(x) - \frac{a^2(x) - b^2(x)}{a(x) \ln \frac{a(x)}{b(x)}} \right] + \frac{\mu \omega_{0x}}{a(x) \ln \frac{a(x)}{b(x)}}. \quad (19)$$

По напряжениям трения вычисляем суммарные силы трения, действующие на соответствующие участки рабочих валков и оправки. Так, для силы трения на поверхности оправки имеем

$$X_{t,b} = 2\pi \int_{l_0}^L \tau^{III}[b'(x)] b(x) dx. \quad (20)$$

Силы трения, действующие на направляющую проводку стана и участки рабочих валков, соответственно определяем в виде

$$X_{t,b}^I = 2\pi \int_{l_0}^{l_1} \tau^I[a'(x)] a(x) dx; \quad (21)$$

$$X_{t,b}^{II} = 2\pi \int_{l_1}^{l_0} \tau^{II}[a'(x)] a(x) dx. \quad (22)$$

Тогда суммарное осевое сопротивление оправки потоку прошиваемого металла в очаге деформации с учетом выражений (14), (19) и (20) окончательно представим в виде

$$X = \int_{l_1}^L 2\pi b(x) b'(x) p dx + \int_{l_1}^L 2\pi b(x) b'(x) \tau^{III} dx. \quad (23)$$

Приведем некоторые результаты математического эксперимента по расчету давления в очаге деформации и распределения сил трения по рабочей поверхности валков и оправки. Характер распределения сил трения по рабочей поверхности валков и оправки представлен на рис. 3 и 4. Расчеты выполнены с учетом наиболее распространенных форм калибровки оправки и условий производства труб на стане пресс-валковой прошивки (материал – сталь 20, диаметр трубы 114×12, скорость прошивки $v_0 = 0,2 - 0,4$ м/с).

Математическое моделирование процесса пресс-валковой прошивки трубной заготовки, как видно из рис. 3, указывает на ярко выраженную динамику нормальных и касательных напряжений. По всей длине очага деформации с увеличением скорости течения металла на образующей оправки, выполненной в виде конуса (рис. 3, а), тора (рис. 3, б), параболы (рис. 3, в), кубической параболы (рис. 3, г), наблюдается восходящая динамика энергосиловых параметров процесса. Расчеты показывают, что для образующей оправки, выполненной в виде кубической параболы, распределение энергосиловых параметров процесса носит рациональный характер. Анализ полученных результатов указывает на необходимость постановки и решения оптимизационной задачи.

Отметим, что усилие прошивки (осевая составляющая давления металла в очаге деформации) трубной заготовки, как видно из выражения (21), является базовым функционалом, преимущественно зависит от формы образующей рабочей поверхности оправки (уравне-

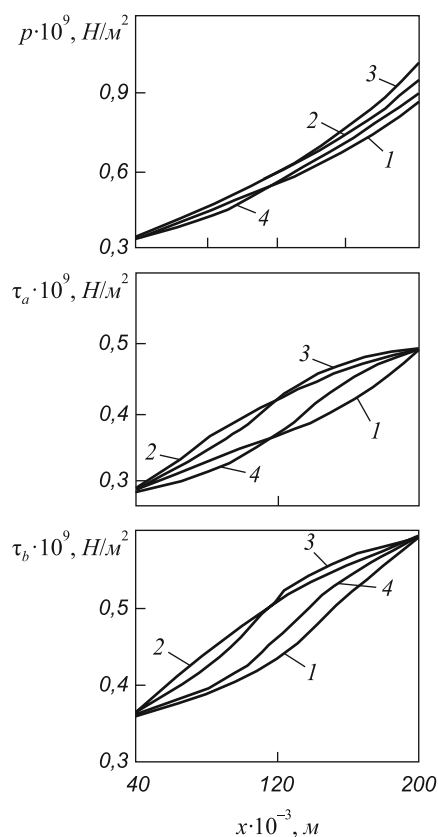


Рис. 4. Распределение давления p , касательных напряжений на валке τ_a и на оправке τ_b в очаге деформации стана пресс-валковой прошивки трубной заготовки с учетом калибровки оправки: 1 – оправка рациональной калибровки; 2 – конус; 3 – парабола; 4 – кубическая парабола

ние $r = b(x)$). Это позволяет соответствующим образом построить и решить следующую вариационную задачу Эйлера: найти такую форму образующей рабочей поверхности оправки $r = b(x)$, при которой суммарное сопротивление оправки было бы минимальным, при условии, что заданы соответственно длина зоны деформации, минимальный и максимальный радиусы оправки на выходе трубы из очага деформации.

Исходя из выражения (23) функционалом осевого сопротивления оправки, зависящим от уравнения образующей $r = b(x)$, является интеграл, который после небольших преобразований можно представить в виде

$$J = \int_{l_1}^L \Phi(b(x), b'(x)) dx, \quad (24)$$

где $\Phi(b(x), b'(x))$ – подынтегральная функция, которая в дальнейшем подлежит минимизации на множестве нормированного пространства очага деформации.

Поскольку подынтегральная функция осевого сопротивления оправки в выражении (24) не зависит явно от координаты x , то первым интегралом уравнения Эйлера [7] для данного вида функционала будет

$$\Phi(b(x), b'(x)) - b'(x)\Phi_{b'(x)} = C, \quad (25)$$

где C – произвольная постоянная.

Исходя из того, что происходит плавное изменение поперечного сечения очага деформации $a'(x) < 0$, $b'(x) > 0$, решение полученного дифференциального уравнения (25) следует реализовать численно при граничных условиях $b(l_1) = 0$ и $b(L) = b_0$, где b_0 – радиус оправки.

Для определения уравнения оптимального профиля рабочего участка оправки (калибровка) нужно так подобрать постоянную C , чтобы образующая калибра всегда проходила через заранее известные две точки, определяющие форму (калибровку) ее рабочей поверхности.

Результаты решения дифференциального уравнения (25) по определению оптимального профиля образующей оправки приведены для условий производства труб на стане пресс-валковой прошивки трубопрокатной установки (материал – сталь 20; диаметр готовой трубы 114×12; скорость прошивки 0,2 м/с) и представлены на рис. 4.

Выводы. Проведено математическое моделирование динамики процесса пресс-валковой прошивки трубной заготовки и уточнены представления о напряженном состоянии металла (рабочей среды) в очаге деформации. Созданы необходимые предпосылки для моделирования и проектирования технологического процесса пресс-валковой прошивки трубной заготовки. Построены кривые, характеризующие зависимость распределения энергосиловых параметров в очаге деформации от формы образующей оправки. Видно, что по всей длине очага деформации с увеличением скорости течения металла на образующей оправки, выполненной в виде конуса, тора, параболы и кубической параболы, наблюдается увеличение как касательных, так и нормальных напряжений. Выявлено, что с увеличением скорости прошивки энергосиловые параметры очага деформации в целом приобретают ярко выраженный динамический характер. Для образующей оправки, выполненной в виде кубической параболы, эти величины ниже, чем для других. На базе принятой гидродинамической осесимметричной модели процесса прошивки сформирован функционал осевого сопротивления оправки потоку прошиваемого металла. Решением базовой вариационной задачи Эйлера путем минимизации функционала осевого сопротивления на множестве нормированного пространства очага процесса прошивки определена рациональная калибровка оправки. Выбором оптимальной калибровки оправки достигнуто рациональное распределение энергосиловых параметров в очаге деформации. На этапе проектирования технологических процессов намечены пути оптимизации процесса пресс-валковой прошивки трубной заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология трубного производства. Учебник для вузов / В.Н. Данченко, А.П. Коликов, Б.А. Романцев, С.В. Самусев. – М.: Интермет-Инжиниринг, 2002. – 640 с.

2. Машины и агрегаты трубного производства: Учебное пособие для вузов / А.П. Коликов, В.П. Романенко, С.В. Самусев и др. – М.: МИСИС, 1998. – 536 с.
3. Колмогоров В.Л. Механика обработки давлением: Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
4. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
5. Илюкович Б.М., Измайлова М.К., Нехаев Н.Е. Теоретические основы механики деформируемой среды. Т. 2. – Днепропетровск: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2007. – 306 с.
6. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Ч. II. – М.: ШФМЛ, 1963. – 728 с.
7. Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А., Губинский А.В. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. – Киев: Наукова думка, 1986. – 240 с.
8. Рахманов С.Р. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 2. С. 52–56.

© 2014 г. С.Р. Рахманов
Поступила 26 декабря 2012 г.

OPTIMIZATION OF PROCESS DYNAMICS PRESS ROLL BILLETS FIRMWARE

S.R. Rakhmanov, *Cand. Eng., Assist. Professor*

Ukrainian National Metallurgical Academy (Dnepropetrovsk, Dnepropetrovsk region, Ukraine)

E-MAIL: npfvostok@mail.ru

Abstract. The article deals with the obtained qualified view of a strained metal state (working environment) in the hearth of deformation zone of a press roller firmware billets for tubes. Using the mathematical modeling it has been established the effect of form forming mandrels and operating rolls on the formation of energy-power parameters of deformation. The features have been formed and a solution to an optimization problem by definition rational profile forming (calibration) of the mandrel has been provided.

Keywords: press, roller, arbor, mathematical model, dynamics, workpiece, deformation zone, tube, functionality, optimization, profile, calibration.

REFERENCES

1. *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva. Uchebnik dlya vuzov.* V.N. Danchenko, A.P. Kolikov, B.A. Romantsev, S.V. Samusev. (Pipe production technology. Textbook for HEE). Moscow: Intermet-Inzhiniring, 2002. 640 p.
2. *Mashini i aggregati trubnogo proizvodstva: Uchebnoye posobiye dlya vuzov.* A.P. Kolikov, V.P. Romanenko, S.V. Samusev i dr. (Machines and aggregates pipe production: A manual for HEE). Moscow: MISiS, 1998. 536 p.
3. *Kolmogorov V.L. Mekhanika obrabotki davleniyem: Uchebnik dlya vuzov* (Mechanics of processing by pressure: Textbook for HEE). Moscow: Metallurgiya, 1986. 688 p.
4. *Gun G.Ya. Teoreticheskiye osnovi obrabotki metallov davleniyem* (Theoretical foundations of plastic metal working). Moscow: Metallurgiya, 1980. 456 p.
5. *Ilyukovich B.M., Izmailova M.K., Nekhaev N.E. Teoreticheskiye osnovi mekhaniki deformiruemoy sredi. T. 2* (Theoretical fundamentals of mechanics deformable medium. Vol. 2). Dnepropetrovsk: RVA «Dnipro-VAL», 2007. 306 p.
6. *Kochin N.E., Kibel' I.A., Roze N.V. Teoreticheskaya gidromekhanika. Ch. II* (Theoretical hydromechanics. Part II). Moscow: ShFML, 1963. 728 p.
7. *Gulyaev Yu.G., Chukmasov S.A., Gubinskiy A.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessov obrabotki metallov davleniyem* (Mathematical modeling of metal forming processes). Kiev: Naukova dumka, 1986. 240 p.
8. *Rakhmanov S.R. Izv. vuz. Chernaya metallurgiya.* 2012. № 2. Pp. 52–56.

Received December 26, 2012