

ДВУХУРОВНЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СТАНА ПИЛИГРИМОВОЙ ПРОКАТКИ ТРУБ

© 2011 О.С. Лехов¹, Ю.Е. Раскатов²

¹ Российский государственный профессионально-педагогический университет,
г. Екатеринбург

² Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

Поступила в редакцию 21.03.2011

Описан алгоритм двухуровневой оптимизации параметров стана пилигримовой прокатки труб. Приведены результаты оптимизации технологических параметров процесса прокатки и параметров линии привода пилигримового стана.

Ключевые слова: *оптимизация, алгоритм, энергоёмкость, математическая модель, целевая функция, динамический момент*

Для повышения эффективности использования станов пилигримовой прокатки бесшовных труб большого диаметра осуществляется их перевод на работу с непрерывнолитой заготовкой круглого сечения. Кроме того, в связи с освоением и расширением сортамента труб из легированных и труднодеформируемых марок стали и повышением требований к их качеству необходимо дальнейшее совершенствование технологического процесса производства труб на пилигримовых станах. В связи с этим необходимо определить оптимальные технологические параметры процесса пилигримовой прокатки труб с позиции снижения энергоёмкости технологического процесса и улучшения качества бесшовных труб, а также оценить нагруженность привода пилигримового стана. Оптимизация только параметров технологического процесса или параметров линии привода прокатного стана не решает более важной задачи – оптимизации прокатного стана как сложной системы взаимосвязанных подсистем очага деформации, механической трансмиссии, подающего аппарата и электропривода. Используемый при этом метод оптимизации параметров пилигримового стана должен учитывать взаимную связь технологических, механических и электрических звеньев стана. Это связано с тем, что пилигримовый стан, оптимизацию параметров которого проводят без учета взаимной связи параметров технологического процесса и привода, при высоких скоростях прокатки и подачах гильзы

в валки может преждевременно выйти из строя вследствие высоких динамических нагрузок, а интенсивные крутильные колебания элементов главной линии и вибрации валковой системы и рабочей клетки могут привести к ухудшению качества труб.

Для определения оптимальных параметров пилигримового стана использован алгоритм двухуровневой оптимизации [1], который включает решение следующих задач:

- 1) оптимизация параметров технологического процесса при заданном сортаменте труб (верхний уровень оптимизации);
- 2) оптимизация параметров линии привода стана при заданных параметрах технологического процесса и электродвигателя, определенных на верхнем уровне оптимизации.

Наиболее важным вопросом является выбор критериев оптимизации, однако задача оптимизации усложняется тем, что пилигримовый стан оценивается по многим и в ряде случаев противоречивым критериям, таким как производительность (Π), энергоёмкость (\mathcal{E}), динамическая нагруженность (H), качество проката (K). Учитывая актуальность экономии материально-энергетических ресурсов в качестве целевой функции при решении задач оптимизации параметров пилигримового стана на верхнем уровне целесообразно принять энергоёмкость технологического процесса (\mathcal{E}), а на другие показатели наложить ограничения. Таким образом, задача оптимизации технологических параметров (верхний уровень) может быть сформулирована следующим образом:

Минимизировать $\mathcal{E}(\bar{X})$. $\bar{X} = [m, \omega]$ при ограничениях: $\Pi \geq \Pi_{\text{зад}}$; $m^{(1)} \leq m \leq m^{(2)}$; $\omega^{(1)} \leq \omega \leq \omega^{(2)}$; $T_{\text{МК}}^{(1)} \leq T_{\text{МК}} \leq T_{\text{МК}}^{(2)}$; $P \leq [P]$; $M \leq [M]$; $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} \leq K_{\text{П}}$; $M_{\text{КВ}} \leq M_{\text{ном}}$, где \mathcal{E} – энергоёмкость процесса

Лехов Олег Степанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика»

Раскатов Евгений Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металлургические и роторные машины». E-mail: raskatov@pochta.ru

пилигримовой прокатки, кВт·ч/т; m – величина подачи гильзы в валки, мм; ω – угловая скорость валка, 1/с; Π – производительность стана, т; P – усилие прокатки, кН; $T_{\text{МК}}$ – температура конца прокатки, °С; M – момент прокатки, кН·м; $M_{\text{НОМ}}$ – номинальный момент электродвигателя, кН·м; $K_{\text{П}}$ – коэффициент перегрузки; $M_{\text{КВ}}$ – среднеквадратичный момент, кН·м.

Математическая модель процесса пилигримовой прокатки включает известные зависимости для расчета силовых параметров, удельного расхода энергии и производительности. Сопротивление пластической деформации определяется по зависимости [2]:

$$\sigma_s = 288 U^{0,107} (\ln \varepsilon)^{1,45} e^{-0,00235T} \quad (1)$$

где σ_s – сопротивление пластической деформации, МПа; U – скорость деформации, 1/с; ε – степень деформации, %.

Графики изменения усилий и моментов прокатки приведены на рис. 1-3.

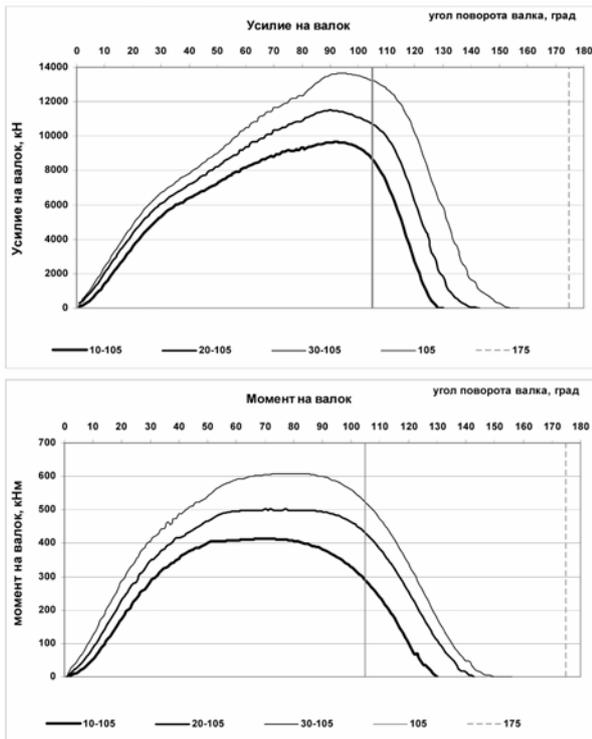


Рис. 1. Изменение усилий и моментов на валок. Калибровка 105-70-45-140

Удельный расход энергии

$$\varepsilon_{\text{уд}} = 2 M \omega t_M / G \quad (2)$$

где M – момент прокатки на один валок, кН·м; ω – угловая скорость валка, 1/с; t_M – машинное время прокатки гильзы, с.

$$t_M = \frac{L_G}{m} \frac{60 (\Theta_B + \Theta_{\Pi})}{n \cdot 2\pi} \quad (3)$$

где L_G – длина гильзы, мм; n – угловая скорость валка, об/мин; Θ_B , Θ_{Π} – соответственно центральные углы бойковой и полирующей частей валка; G – масса гильзы, т.

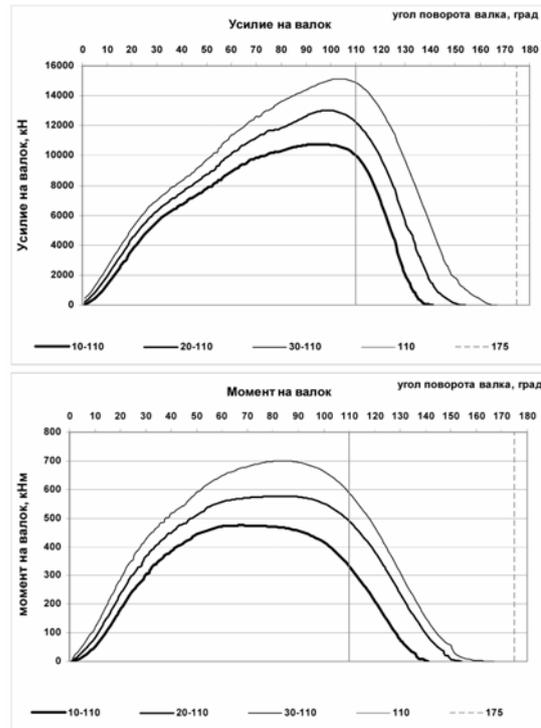


Рис. 2. Изменение усилий и моментов на валок. Калибровка 110-65-45-140

Для расчета использованы следующие значения параметров: $G=3200$ кг, $n=45$ об/мин, $T = 1050^\circ\text{C}$, диаметр гильзы 500 мм, диаметр дорна 300 мм, диаметр трубы 325 мм, допустимое усилие прокатки $[P]=8000$ кН, $\Theta_B=110^\circ$, $\Theta_{\Pi}=65^\circ$. Для решения задачи оптимизации параметров пилигримового стана использован комбинированный алгоритм, построенный на базе методов случайного поиска и симплекса Нелдера-Мида [1]. В качестве целевой функции на верхнем уровне оптимизации использована удельная энергоёмкость процесса пилигримовой прокатки. Диапазоны изменения варьируемых параметров: $10 \leq m \leq 35$ мм, $3,14 \leq \omega \leq 6,28$ 1/с.

Результаты расчета приведены на рис. 4. Полученные результаты с учетом данных теоретического исследования напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации пилигримовой прокатки [3] позволяют обоснованно выбрать оптимальную величину подачи гильзы в валки с позиции выполнения заданной производительности, снижения энергоёмкости технологического процесса и нагруженности механического оборудования и улучшения качества бесшовных труб. С учетом результатов комплексного

исследования оптимальная величина подачи равна 20 мм.

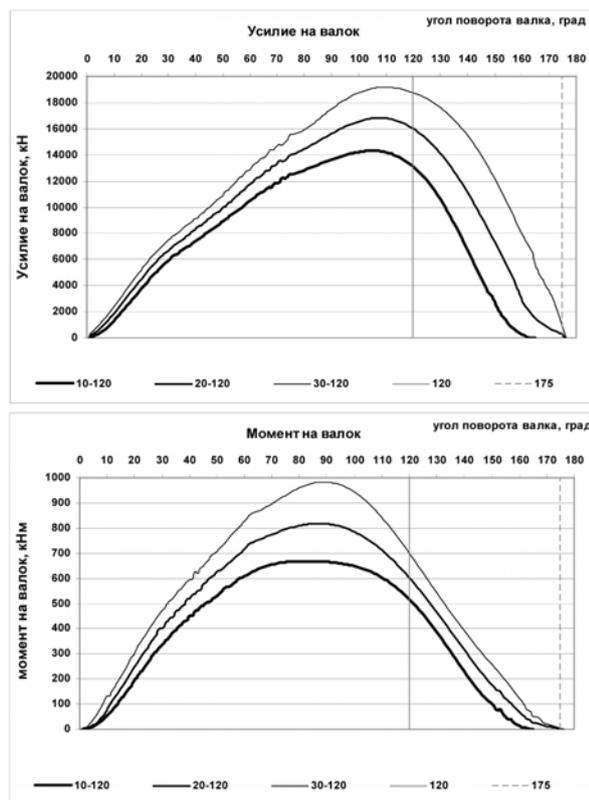


Рис. 3. Изменение усилий и моментов на валок. Калибровка 120-55-45-140

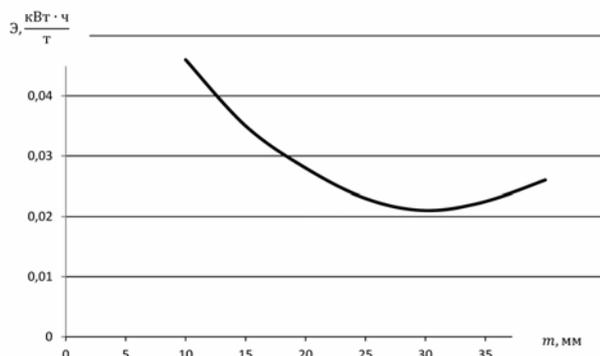


Рис. 4. Зависимость удельной энергоёмкости от величины подачи гильзы в валки пилигримового стана

Как отмечалось выше, при интенсификации режимов пилигримовой прокатки возрастает как уровень динамической нагруженности несущих элементов главной линии пилигримового стана, так и взаимная связь процессов, происходящих в очаге деформации и линии привода [3]. Таким образом, динамические параметры привода, схема компоновки привода и конструктивные параметры, параметры очага деформации в совокупности определяют динамическую нагруженность элементов стана, в частности зубчатых передач, и качество труб.

Кроме того, в машинах и агрегатах периодического действия наблюдается большое количество поломок несущих элементов привода, основной причиной которых являются динамические нагрузки [1]. В связи с этим в качестве критерия оптимизации (второй уровень) параметров пилигримового стана целесообразно использовать динамическую нагруженность, поскольку снижение данного показателя позволит повысить долговечность несущих звеньев, а также улучшить качество труб. Таким образом, в качестве целевой функции целесообразно принять максимальную амплитуду динамического момента, то есть

$$F = M^D$$

где M^D – максимальная амплитуда момента крутильных колебаний, кН·м.

Однако линия привода пилигримового стана включает в свой состав шестеренную клетку, на моторном валу имеется маховик, то есть является многомассовой системой. В связи с этим в процессе оптимизации необходимо добиться снижения динамических нагрузок во всех или более слабых звеньях линии привода, то есть задача является многокритериальной. Поэтому целевую функцию (F) следует записать в виде [1], а задачу оптимизации (второй уровень) сформулировать следующим образом: Минимизировать

$$F = \sum M_i^D + \sum_{j=1}^{n-1} K_j (M_j^D - M_{j+1}^D), \bar{X} = [c, J]$$

при параметрических ограничениях: $c_i^{(1)} \leq c_i \leq c_i^{(2)}$; $J_i^{(1)} \leq J_i \leq J_i^{(2)}$, где K_j – коэффициент штрафа; c_i – жесткость упругой связи; J_i – момент инерции сосредоточенной массы.

Решение задачи оптимизации параметров линии привода пилигримового стана осуществляется с помощью математической модели, включающей модели очага деформации и линии привода. Система дифференциальных уравнений, описывающих динамические процессы в линии привода пилигримового стана согласно расчетной схеме (рис. 5), имеет вид:

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\varphi}_1 &= M_{oe} - c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - q_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2); \\ J_2 \ddot{\varphi}_2 &= c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + q_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_{24}(\varphi_2 - \varphi_4) - \\ &- q_{24}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_4) - c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) - q_{23}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3); \\ J_3 \ddot{\varphi}_3 &= c_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) + q_{23}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - M_3; \\ J_4 \ddot{\varphi}_4 &= c_{24}(\varphi_2 - \varphi_4) + q_{24}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_4) - c_{45}(\varphi_4 - \varphi_5) - \\ &- q_{45}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5); \\ J_5 \ddot{\varphi}_5 &= c_{45}(\varphi_4 - \varphi_5) + q_{45}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_5) - M_5; \\ T_3 \dot{M}_{oe} &= -M_{oe} - \frac{(\dot{\varphi}_1 - \omega_0)}{\mathcal{I}\omega_0}; \end{aligned} \tag{4}$$

где T_3 – электромагнитная постоянная двигателя; \mathcal{G} – модуль жесткости механической характеристики; ω_0 – угловая скорость на холостом ходу, $1/c$; J – момент инерции сосредоточенной массы, $t \cdot m^2$ ($kH \cdot m \cdot c^2$); c – жесткость упругой связи, $kH \cdot m / рад$; q – коэффициент эквивалентного вязкого демпфирования, $kH \cdot m \cdot c$; M_3, M_5 – моменты на валках, $kH \cdot m$; $\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$ – соответственно угол поворота, угловая скорость и угловое ускорение сосредоточенной массы; K_3, K_5 – эмпирические коэффициенты, определяющие время переходного процесса захвата гильз валками.

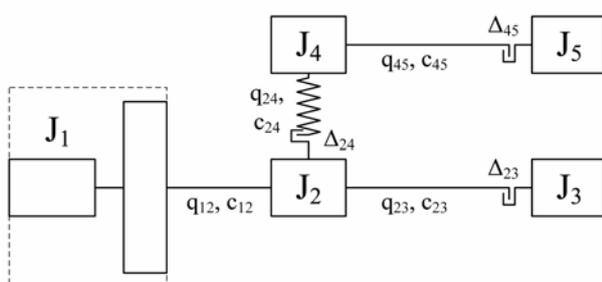


Рис. 5. Расчетная схема линии привода пилигримового стана

Задача оптимизации решена для наиболее тяжелого режима нагружения линии привода пилигримового стана – мгновенного приложения нагрузки при захвате гильзы валками. Время переходного процесса захвата гильзы

валками $0,05$ с. В качестве варьируемых параметров использованы жесткости упругих связей c_{23}, c_{45} . Начальные значения конструктивных параметров равны параметрам пилигримового стана №2 ОАО «ЧТПЗ», диаметры шпинделей которого 390 мм. Решение системы дифференциальных уравнений (4) проводили методом Рунге-Кутты.

Выводы: в процессе оптимизации варьировали жесткости шпинделей (c_{23}, c_{45}) в диапазоне $7000-14000$ $kH \cdot m / рад$. Установлено, что при мгновенном приложении нагрузки ($0,03 \div 0,05$ с) при захвате гильзы валками пилигримового стана жесткости шпинделей практически не влияют на максимальную амплитуду динамического момента крутильных колебаний, которая равна $1130 \div 1170$ $kH \cdot m$. Эти динамические нагрузки следует учитывать при расчете элементов линии привода пилигримовых станов на прочность и долговечность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Лехов, О.С. Оптимизация машин для деформации непрерывнолитых заготовок. – М: УИФ «Наука». 1995. 182 с.
2. Мазур, В.Л. Сопротивление деформации низколегированных сталей / В.Л. Мазур, Д.Д. Хижняк // Сталь. 1991. №8. С. 41-43.
3. Чучулин, Ю.Б. Измерение нагрузок на шпинделях валков пильгерстана / Ю.Б. Чучулин и др. // Металлург. 2007. №6. С.47-49.

TWO-LEVEL OPTIMIZATION OF PILGER ROLLING MILL PARAMETERS

© 2011 O.S. Lehov¹, Yu.E. Raskatov²

¹ Russian State Professional-pedagogical University, Ekaterinburg

² Ural Federal University, Ekaterinburg

The algorithm of two-level optimization of pilger rolling mill parameters is described. Results of optimization the technological parameters of rolling processes and parameters of drive line of pilger rolling mill are resulted.

Key words: *optimization, algorithm, power consumption, mathematical model, criterion function, dynamic moment*

Oleg Lehov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the "Mechanics" Department

Evgeniy Raskatov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the "Metallurgical and Rotor Machines" Department. E-mail: raskatov@pochta.ru