

Б.П. Середа ⁽¹⁾, зав. каф., д.т.н., профессор

В.М. Проценко ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

А.Н. Тумко ⁽²⁾, зам. начальника ЦЗЛ

В.Н. Михайлин ⁽¹⁾, профессор, д.т.н.

Н.И. Прищип ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

И.В. Кругляк ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

А.С. Жагров ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

А.К. Коваленко ⁽¹⁾, аспирант

ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЬ ЛИНЕЙНЫХ И ОБЪЕМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКЕ

⁽¹⁾ Запорожская государственная инженерная академия,

⁽²⁾ ОАО «Электрометаллургический завод «Днепрспецсталь»

Наведено аналітичні дослідження впливу геометричних параметрів валка прокатного стану на площу його зовнішньої поверхні та об'єм з метою забезпечення максимальної тепловіддачі при мінімальному об'ємі валка. На основі виконаних розрахунків надано рекомендації щодо вибору співвідношення діаметра та довжини бочки валка, які можуть бути використані під час проектування валкового вузла стану гарячої прокатки листів та штаб.

Приведены аналитические исследования влияния геометрических параметров валка прокатного стана на площадь его наружной поверхности и объем с целью обеспечения максимальной теплоотдачи при минимальном объеме валка. На основе проведенных расчетов даны рекомендации по выбору соотношения диаметра и длины бочки валка, которые могут быть использованы при проектировании валкового узла стана горячей прокатки листов и полос.

Введение. В процессе горячей прокатки листов и полос происходит интенсивный износ поверхности рабочих валков прокатных станов. Валки нагреваются в результате контактного взаимодействия с нагретой заготовкой металла, а также трения между валками и прокатываемым металлом. С увеличением температуры валка уменьшается его износостойкость, твердость и прочность. Кроме того, в результате нагрева происходит изменение диаметра валка по длине бочки. При температуре металла 900 °С поверхность валков нагревается до 160...180 °С, а на участках отсутствия окалины – до 380...500 °С, что вызывает разрушение поверхностного слоя [1-4].

Очевидно, что при прочих равных условиях, чем больше площадь наружной поверхности валка, тем больше теплоотдача в окружающую среду (охлаждающей воде, воздуху) и, как следствие, ниже температура валка. С другой стороны, чем больше площадь наружной поверхности валка, тем больше его объем и масса.

Постановка задачи. Основными геометрическими параметрами, определяющими габариты валка, являются диаметр и длина бочки. Задача настоящего исследования заключается в определении влияния диаметра и длины бочки валка на площадь его наружной поверхности и объем с целью увеличения площади теплоотдающей поверхности при минимальном объеме и уменьшения износа валка в процессе горячей прокатки.

Основная часть исследований. Представим бочку валка с гладкой поверхностью в виде цилиндра диаметром d и длиной l . В качестве показателя, характеризующего

геометрические параметры валка, используем его удельную теплоотдающую поверхность P :

$$P = \frac{S}{V}, \quad (1)$$

где S – площадь поверхности валка; $S = 0,5\pi \cdot d^2 + \pi \cdot d \cdot l$; V – объем валка, $V = 0,25\pi \cdot d^2 \cdot l$.

Исключая параметр l , выражение (1) можно записать как:

$$P = \frac{1}{2} \frac{\pi \cdot d^3 + 8V}{d \cdot V}. \quad (2)$$

Первой задачей является нахождение при заданном объеме валка V значения его диаметра d , при котором удельная поверхность P характеризуется минимальной величиной.

Известно, что в точках максимума и минимума первая производная равна нулю. Дифференцируя равенство (2) по d и, приравнявая первую производную нулю, получаем:

$$d = \frac{1}{\pi} \cdot (\pi^3 \cdot d^2 \cdot l)^{\frac{1}{3}}. \quad (3)$$

При решении уравнения (3) имеем: $d = l$. Поскольку вторая производная равенства (2) положительна, то при $d = l$ удельная поверхность валка P будет минимальной, а, следовательно, теплоотдача в окружающую среду также имеет минимальную величину.

После подстановки $d = l$ в выражение (2) можно записать

$$P = \frac{6}{d}. \quad (4)$$

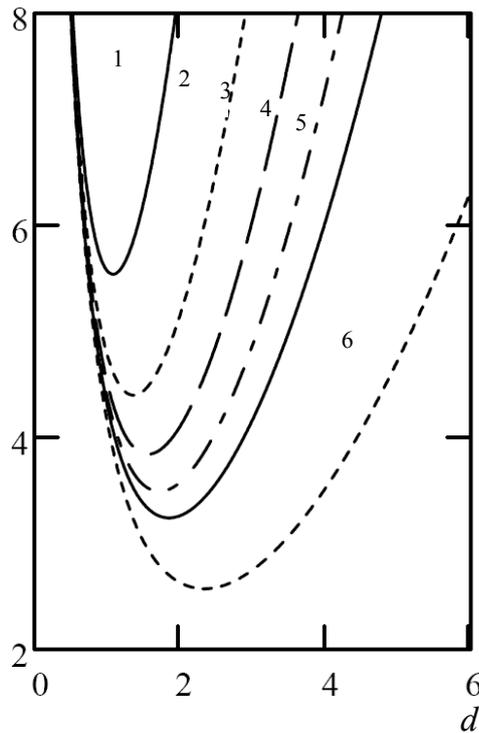
Таким образом, при заданном объеме валка и $d = l$ его удельная поверхность минимальна и равна $P = 6 / d$.

Используя выражение (2) и произвольно задавая значения объема $V = 1, 2, 3, 4, 5, 10$, строим графики зависимости $P = f(d)$ в условных единицах (рис. 1).

Как видно на рис. 1, функция P имеет минимум в точке перегиба, то есть при $d = l$, причем наблюдается несимметричный характер изменения относительно этой точки: левая ветвь является более крутой, а правая – более полой.

Рассмотрим три валка различного диаметра и длины, но одинакового объема, равного $0,5 \text{ м}^3$. Валок 1 имеет диаметр, равный длине валка, для валков 2 и 3 диаметр соответственно уменьшен и увеличен на 25 % по сравнению с валком 1. Удельная поверхность, рассчитанная по формуле (4), для валков 1, 2 и 3 составляет соответственно 6,977; 7,509 и 7,351 м^{-1} . Из этих данных видно, что при заданном объеме наименьшая удельная поверхность достигается при длине валка, равной его диаметру (валок 1). При уменьшении или увеличении диаметра валка его удельная поверхность увеличивается, причем при уменьшении диаметра она увеличивается на большую величину (валок 2 – на 8 %), чем при увеличении диаметра (валок 3 – на 5 %) по сравнению с валком 1.

$P(d)$



Кривые 1 - 6 соответствуют объему валка 1 - 5, 10 в условных единицах
Рисунок 1 – Зависимость удельной поверхности валка от его диаметра при заданном объеме

Второй задачей служит определение при заданном диаметре валка d значения его объема V , при котором достигается минимальная удельная поверхность P .

Дифференцируя равенство (2) по V и приравнявая первую производную нулю, получаем:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{-1}{2} \pi \cdot \frac{d^2}{V^2} ; \quad (5)$$

$$\frac{-1}{2} \pi \cdot \frac{d^2}{V^2} = 0 . \quad (6)$$

Уравнение (6) не имеет решений. Поэтому, задавая значения диаметра валка $d = 0,5; 1; 2; 3; 4; 5$, строим графики зависимости $P = f(V)$ согласно уравнению (2).

Из данных, приведенных на рис. 2, следует, что с увеличением объема валка (при заданном диаметре валка – увеличением его длины) удельная поверхность валка уменьшается, причем до определенного предела. Определяем значение этого предела, используя выражение (2):

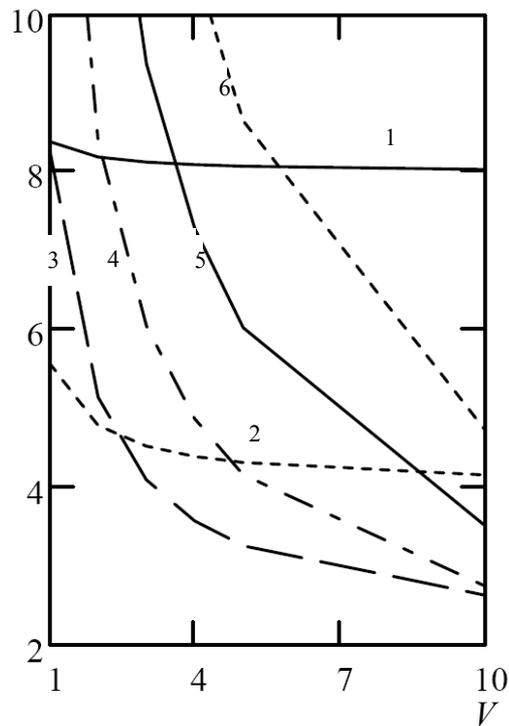
$$\lim_{V \rightarrow \infty} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot d^3 + 8 \cdot V}{d \cdot V} = \frac{4}{d} . \quad (7)$$

Таким образом, при заданном диаметре валка с увеличением его объема удельная поверхность уменьшается и стремится к значению $4/d$.

Определяем R по разности выражений (4) и (7):

$$R = \frac{2}{l} \quad (8)$$

$P(V)$



Кривые 1 - 6 соответствуют диаметру валка 0,5, 1 - 5 в условных единицах

Рисунок 2 – Зависимость удельной поверхности валка от объема валка при заданном его диаметре

и расписываем эту разность как функцию

$$y = \frac{k}{x} \quad (9)$$

Выражение (9) представляет собой уравнение равносторонней гиперболы. Вводя обозначения: $k = 0,5 \cdot a^2$, $a = 2$, $x = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (x' - y')$, $y = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (x' + y')$ – , записываем данное уравнение в канонических координатах:

$$\frac{x'^2}{a^2} - \frac{y'^2}{a^2} = 1 \quad (10)$$

Принимая для длины валка только положительные значения, получаем:

$$y'_1 = \sqrt{x'^2 - a^2}; \quad y'_2 = -\sqrt{x'^2 - a^2}.$$

Фокус гиперболы равен: $F = \sqrt{a^2 + a^2}$.

Тогда в фокусе $F = 2\sqrt{2}$; $x'_F = 2\sqrt{2}$; $y'_{F1} = 2$ $y'_{F2} = -2$.

При переходе к старой системе координат получаем:

$$x_{1,F} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (x'_F - y'_{F1}) = 0,586;$$

$$x_{2,F} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (x'_F - y'_{F2}) = 3,414;$$

$$y_{1,F} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (x'_F + y'_{F1}) = 3,414 ;$$

$$y_{2,F} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (x'_F + y'_{F2}) = 0,586 .$$

Используя полученные точки, строим график зависимости (8):

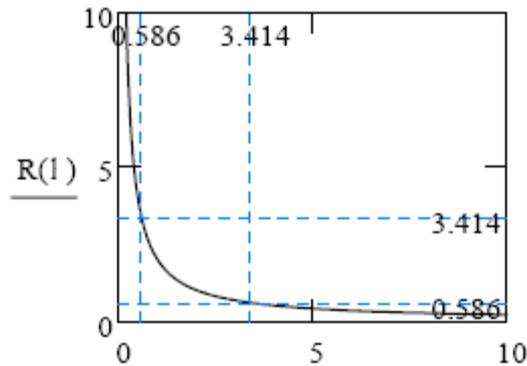


Рисунок 3 – График уравнения (8) с нанесенными на него характерными точками

Из рис. 3 следует, что при заданном диаметре валка увеличение его длины приводит к уменьшению удельной поверхности P . Однако при увеличении длины валка более чем в 3,414 раз по сравнению с его диаметром, уменьшение величины параметра P незначительное. Другими словами, можно приближенно считать, что уменьшение удельной поверхности валка происходит только при увеличении l до 3,414. При дальнейшем увеличении длины валка его удельная поверхность уже практически не изменяется и остается на прежнем уровне.

Рассматриваем вышеизложенное на примере (см. рис. 4).

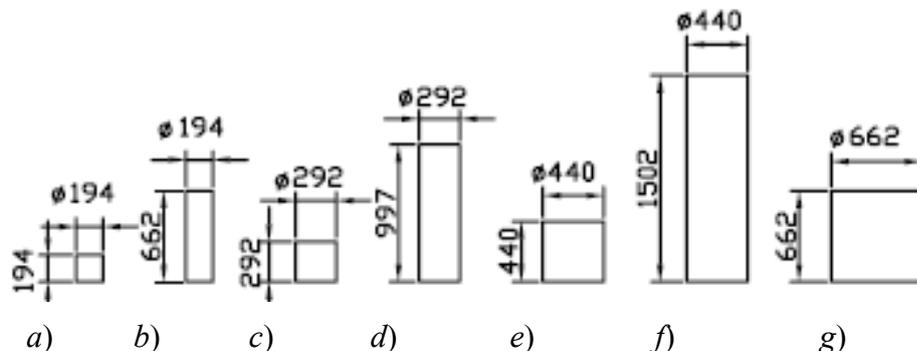


Рисунок 4 – Изменение формы и объема валка при минимальной удельной поверхности валка (размеры приведены в мм)

При $d = l$ (рис. 4,а) удельная поверхность валка при данном его объеме будет минимальной (табл. 1). При увеличении длины валка возрастает его объем, а удельная поверхность уменьшается. При длине валка $3,414 \cdot 194 = 662$ мм (рис. 4,б) его удельная поверхность будет минимальной для данного диаметра (при дальнейшем увеличении длины и объема валка удельная поверхность уменьшается незначительно). Для еще большего уменьшения удельной поверхности валка при данном его объеме необходимо увеличить диаметр валка до величины $d = l$ (рис. 4,с). Дальнейшее уменьшение удельной поверхности валка возможно при увеличении его длины до $3,414 l$ (рис. 4,д). При увеличении диаметра валка при данном объеме происходит дальнейшее уменьшение его удельной поверхности (рис. 4,е). Последующее увеличение длины валка до $3,414 l$ приводит к уменьшению его удельной поверхности до минимальной величины для данного диаметра валка (440 мм на рис. 4,ф). Дальнейшее уменьшение удельной

поверхности валка происходит только при увеличении его диаметра до величины $d = l$ и т.д.

Таблица 1 – Зависимость удельной поверхности валка от диаметра и длины бочки валка в соответствии с рис. 4

Позиция на рис. 4	Диаметр валка d , м	Длина бочки валка l , м	Объем валка V , м ³	Удельная поверхность P , 1/м
<i>a</i>	0,194	0,194	0,0057	30,928
<i>b</i>	0,194	0,662	0,0196	23,638
<i>c</i>	0,292	0,292	0,0196	20,539
<i>d</i>	0,292	0,997	0,0668	15,698
<i>e</i>	0,440	0,440	0,0668	13,640
<i>f</i>	0,440	1,502	0,2282	10,425
<i>g</i>	0,662	0,662	0,2282	9,059

Вышеизложенные расчеты и заключения справедливы не только для валков прокатных станков, но и роликов рольгангов, машин непрерывного литья заготовок и других вращающихся рабочих органов оборудования цилиндрической формы, которые испытывают температурные нагрузки.

Выводы

1. Величина удельной поверхности валка P зависит от его диаметра d и длины l . Во всех случаях увеличение объема валка приводит к уменьшению его удельной поверхности.

2. При заданном объеме валка его минимальной удельной поверхности достигают при $d = l$. При этом $P = 6 / d$. При уменьшении длины валка по сравнению с его диаметром ($l < d$) удельная поверхность валка увеличивается ($P > 6 / d$), но не так быстро, как при увеличении длины валка по сравнению с его диаметром ($l > d, P \gg 6/d$).

3. При заданном диаметре валка его удельная поверхность уменьшается при увеличении длины валка. Уменьшение величины параметра P происходит до определенного предела, равного $P = 4 / d$. Минимальная удельная поверхность достигается при длине более 3,414 диаметра валка ($l > 3,414 d$). Дальнейшее увеличение длины валка оказывает незначительное влияние на уменьшение его удельной поверхности.

4. Для минимизации упругой деформации валкового узла прокатного стана необходимо стремиться к тому, чтобы диаметр валка был равен его длине ($d = l$), что обеспечивает самый жесткий прокатный узел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Целиков А. И. Машины и агрегаты металлургических заводов / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребенник. – М.: Металлургия, 1988. – Т. 3. – 680 с.
2. Николаев В. А. Валки прокатных станков / В. А. Николаев. – Запорожье: Изд-во ЗГИА, 2000. – 176 с.
3. Васильев А. А. Исследование влияния точности монтажа валкового узла на профиль полосы ШСП 1680 в условиях ОАО «Запорожсталь» / А. А. Васильев, Н. И. Прищип // XII науково-технічна конференція студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА (16-20 квітня 2007 р.): Тези доповідей. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2007. – Ч. II. – С. 141.
4. Серета Б.П. Обробка металів тиском / Б.П. Серета. – Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2009. – 343 с.

Стаття надійшла до редакції 14.12.2010 р.
Рецензент, проф. Т. В. Критська