

А.Ю. Хитько, Л.Х. Иванова, М.А. Хитько, Л.А. Шапран
**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ
КОНСТРУКЦИИ РОЛИКОВ МНЛЗ**

Аннотация. В работе показано, что толщина наружного рабочего слоя биметаллического ролика из высоколегированной стали может быть уменьшена на 20 мм при общей толщине стенке бочки ролика 75-90 мм, что позволяет усовершенствовать технологию его изготовления.

Ключевые слова: сталь, непрерывное литье, биметаллический ролик, конструкция, МНЛЗ

Постановка проблемы и состояние вопроса. Перспективным направлением является разработка бандажированных роликов для зоны вторичного охлаждения машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) с повышенной жаропрочностью, абразивной и коррозионной стойкостью.

Условия работы роликов в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ характеризуются: малой скоростью вращения (до 1 об/мин), значительными и переменными термическими и механическими нагрузками, интенсивным абразивным и гидроэрозионным износом, ударами при прохождении холодного конца заготовки. Максимальная температура поверхности роликов достигает 550°C , перепад температуры по сечению до 470°C , по длине – 220°C . В итоге в роликах развиваются сетка разгара, кольцевые трещины, износ поверхности или происходит налипание материала заготовки на поверхность роликов. Все перечисленные повреждения сокращают срок службы роликов МНЛЗ.

Повышение ресурса работы роликов достигается в частности выбором материала бандажа, устойчивого к абразивному износу, коррозионному и термическому разрушению в условиях контакта с горячим слябом, наружным и внутренним охлаждением водой.

В США, ФРГ, Японии, Франции и Великобритании изготавливают в промышленных масштабах биметаллические центробежнолитые изделия в виде износостойких труб, заготовок для горячей де-

формации, различных втулок, а также заготовок для бандажей и бочек роликов.

Из большого количества возможных сочетаний металлов, составляющих биметаллические пары, наиболее распространены стали и сплавы на основе железа, например, сталь – сталь, сталь – чугун.

Опорные ролики МНЛЗ работают в условиях, при которых факторами, определяющими их долговечность и работоспособность, являются износ и образование сетки трещин разгара от термоциклического нагружения.

Целью исследования являлось повышение конструкционной прочности бандажа роликов, отвечающих условиям службы роликов МНЛЗ.

Результаты исследований и их обсуждение. Повысить конструкционную прочность биметаллических роликов можно путем изменения соотношения толщин слоев биметалла в сторону увеличения слоя из более прочного материала, уменьшения диаметра внутренней полости и подбором более прочного материала для одного или обоих слоев ролика.

Наружный диаметр роликов определяется конструкцией конкретной МНЛЗ, а внутренний – возможностью литья трубных заготовок центробежным способом и необходимой интенсивностью охлаждения ролика. Геометрические параметры роликов радиального участка слябовых криволинейных МНЛЗ с наружным диаметром 0,27 и 0,3 м практически исчерпываются возможностью получения диаметра внутренней полости способом центробежного литья соответственно 0,15 и 0,13 м.

Расчетным методом по методике, приведенной в [1, 2], были определены минимально возможные толщины слоев для бочек роликов исследуемых исполнений диаметром 270 и 300 мм (табл. 1).

Исходя из условий работы роликов, глубины прогрева при контакте со слитком, возможности ремонта проточкой и наплавкой, толщина износостойкого слоя может быть уменьшена с 20...25 до 7...15 мм. Из данных таблицы 1 видно, что оптимальное значение для обоих исполнений роликов не превосходит этих величин.

Таблица 1

Минимально возможные толщины слоев биметаллических роликов

Исполнение ролика	Основные размеры слоев в заготовках			
	Диаметр ролика D , мм	Диаметр границы слоев d_H , мм	Оптимальная толщина наружного слоя l_H , мм	Отношение модулей упругости $\frac{E_H}{E_B}$
20X25H19C2Л–20Л	270	254	8,0	0,94
	300	282	9,0	
17X12МФЛ–20Л	270	268	1,0	0,991
	300	297	1,5	

Для нахождения соотношения между толщинами наружного износостойкого и внутреннего несущего слоев в биметаллической заготовке определяли напряжения в этих слоях от силовых и температурных нагрузок.

Например, при расчете напряжений в биметаллическом ролике диаметром 300 мм исполнения 20X25H19C2Л–20Л показано, что максимальные напряжения были в зоне контакта со слитком, они достигали 616 МПа в наружном слое и 481 МПа во внутреннем слое (табл.2). Со стороны, противоположной слитку, напряжения – более низкие, соответственно 104 и 67 МПа, но возросли напряжения на внутренней поверхности ролика – до 167 МПа.

Таблица 2

Распределение суммарных напряжений по глубине ролика

ρ , м	Напряжения, МПа			Слой ролика
	$\sigma_{\text{верхн}}$	$\sigma_{\text{нижн}}$ (контактирует со слитком)	Допускаемое напряжение $[\sigma]$	
0,150	-104	-616	260	Наружный
0,145	-79	-554		
0,140	-55	-492		
0,140	-67	-481	201	Внутренний
0,130	-18	-368		
0,120	28	-261		
0,110	72	-164		
0,100	121	-76		
0,090	150	-5		
0,085	167	47		

Таким образом, наружный слой в зоне контакта на всю глубину работает за пределом текучести, а напряжения во внутреннем слое на нижней части ролика и на верхней его границе превосходят допускаемые более чем в 2 раза. По толщине они меняют знак и на

нижней границе равны половине допускаемых напряжений. Поэтому выполнили расчет напряжений по толщине внутреннего слоя через каждые 10 мм (см. табл. 2).

Напряжения во внутреннем слое для верхней половины ролика по всей глубине не превышают допускаемых, а в нижней половине до глубины 60 мм от наружной поверхности ролика превосходят допускаемые (см. табл. 2).

Повысить несущую способность внутреннего слоя можно двумя способами – увеличить его толщину за счет уменьшения внутреннего отверстия или выбрать материал с более высокими механическими свойствами. Второй путь более перспективен, так как позволяет сохранить преимущества биметаллического ролика не только по износу, но и выполнить его более легким по сравнению с кованым.

Расчет выполняли для ролика исполнения 20X25H19C2Л–20Л. В расчетные формулы входили отношения модулей упругости для наружного и внутреннего слоев, которые близки к отношениям модулей упругости материалов для ролика исполнения 17X12МФЛ–20Л, а так как допускаемые напряжения для этого сочетания более высокие, то напряженно-деформированное состояние роликов из этого материала будет более благоприятным.

Расчет напряжений проводили исходя из температурного поля ролика в установившемся режиме. Даже в этом, наиболее благоприятном случае напряжения в нем были велики для исполнения 20X25H19C2Л–20Л, так как ролики диаметром 300 мм испытывают значительные силовые нагрузки. Этот биметалл, имеющий хорошую термостойкость, может быть использован для роликов менее нагруженного участка технологической линии.

Ролики МНЛЗ работают в таких условиях, что напряжения в некоторых местах сечения ролика практически всегда будут превосходить допускаемые, но они носят локальный характер и ограничены зоной контакта со слитком. Поэтому воздействие их на материал ролика кратковременное и распространяется неглубоко. Если добиваться снижения напряжений во всех частях сечения ниже допускаемых, то ролики будут очень дорогими с дефицитными добавками легирующих элементов. Значительно проще и экономичнее добиться увеличения несущей способности внутреннего слоя – упрочнить его. Под упрочнением надо понимать не столько увеличение толщины его,

сколько повышение механических свойств материала. При этом образующиеся термические трещины в наружном слое будут разгружать его от температурных напряжений, а высокую прочность и долговечность ролика обеспечит внутренний слой.

Подбор материалов дает более широкую возможность увеличения конструкционной прочности роликов. Материал наружного слоя, например, сталь 17Х12МФЛ, должен обеспечить высокую износостойкость и разгаростойкость поверхности бочки ролика, а материал для внутреннего слоя (сталь 22ХМФЛ) с высоким уровнем прочностных и пластических свойств повышает конструкционную прочность ролика [3, 4].

Соотношение толщин слоев биметалла ролика определяли из условий получения минимальных по величине остаточных напряжений в заготовке и ролике и возможностью получения хорошей свариваемости сплавов биметаллов в процессе центробежного литья. В результате установлено, что оптимальная величина граничного диаметра, диаметра соединения слоев для роликов диаметром 0,30 м составляет 0,27 м, а для ролика диаметром 0,27 м – 0,24 м. Выбранные соотношения требуют проверки на допускаемые напряжения, исходя из условий эксплуатации, поэтому был выполнен расчет напряжений в биметаллических роликах исполнения 17Х12МФЛ–22ХМФЛ с утонченными внутренними слоями от воздействия силовых и температурных нагрузок.

Наиболее приемлемыми по геометрическим размерам для роликов с биметаллическими бочками диаметром 300 мм являются заготовки с размерами 330х250х150х3600 мм и для роликов диаметром 270 мм – 290х220х130х3600 мм.

С целью обоснования возможности изменения толщин слоев и граничных диаметров выполнены расчеты по корректировке геометрических размеров роликов радиального участка.

Исходные данные для расчета биметаллического ролика диаметром 300 мм: 1) диаметры: наружный (D) – 300 мм; границы слоев (d_n) – 250 мм; внутренний ($d_{вн}$) – 150 мм, диаметром 270 мм: 1) диаметры: наружный (D) – 270 мм; границы слоев (d_n) – 220 мм; внутренний ($d_{вн}$) – 130 мм.

2) С целью уменьшения скачка напряжений на границе слоев и увеличения прочностных характеристик выбраны материалы со сле-

дующими значениями модуля упругости и коэффициента термического расширения. Модули упругости: внутреннего слоя $E'_e=183900$ МПа, наружного слоя $E'_n=180900$ МПа. Допускаемые напряжения материала: наружного слоя $[\sigma'_n]=490$ МПа, внутреннего $[\sigma'_{en}]=308$ МПа. Коэффициенты линейного расширения слоев: наружного при температурах $t=60 \div 350^\circ\text{C}$ $\alpha'_n=1,1 \cdot 10^{-5}$; $t=400^\circ\text{C}$ $\alpha'_n=1,2 \cdot 10^{-5}$; $t=450^\circ\text{C}$ $\alpha'_n=1,4 \cdot 10^{-5}$; $t=470^\circ\text{C}$ $\alpha'_n=1,55 \cdot 10^{-5}$; внутреннего – при температурах $t=60 \div 350^\circ\text{C}$ $\alpha'_n=1,66 \cdot 10^{-5}$.

Распределение температуры в верхней половине ролика описывается зависимостью

$$t = 37,37 + 97,63 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2, \quad (1)$$

где ρ – текущее значение радиуса;

R – наружный радиус ролика.

Температура в нижней половине ролика аппроксимируется формулой

$$t = \left[37,37 + 97,63 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2 \right] \cdot \left(1 - 2,5 \frac{\rho}{R} \sin \varphi \right). \quad (2)$$

Коэффициент линейного расширения наружного слоя в нижней половине ролика определяется по формуле

$$\alpha'_n = 1,1 \cdot 10^{-5} \left[1 - 0,41 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2 \sin \varphi \right]. \quad (3)$$

Модули упругости слоев в нижней половине ролика изменяются согласно следующим формулам:

$$E'_n = E'_e \left[1 + 0,15 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2 \sin \varphi \right], \quad (4)$$

$$E'_e = E'_e \left[1 + 0,15 \left(\frac{\rho}{R} \right)^2 \sin \varphi \right]. \quad (5)$$

Температура на границе слоев в верхней половине ролика $t^*_e=105,1686^\circ\text{C}$, в нижней половине ролика – $t^*_n=324,2693^\circ\text{C}$. Силовые характеристики температурного изгиба в ролике диаметром 300 мм:

$N_t = 3,174126$ МН, $M = -94,61708$ кНм, $y^* = -0,0298$ м, а в ролике диаметром 270 мм - $N_t = 2,676829$ МН, $M = -62,08895$ кНм, $y^* = -0,0232$ м. Расчетные данные представлены в табл.3-6.

Таблица 3
Механические характеристики сечения ролика диаметром 300 мм

$\int_{(F_6)} E_6 dF_6$	$\int_{(F_n)} E_n dF_n$	$\int_{(F_6)} E_6 \alpha_6 t_6 F_6$	$\int_{(F_n)} E_n \alpha_n t_n F_n$
$1,945338 E_6 r^2$	$0,921 E_n R^2$	$4,099431 \cdot 10^{-3} E_6 r^2$	$2,153887 \cdot 10^{-3} E_n R^2$
$\int_{(F_n)} E_n y^2 dF_n$	$\int_{(F_6)} E_6 y^2 dF_6$	$\int_{(F_n)} E_n \alpha_n t_n y dF_n$	$\int_{(F_6)} E_6 \alpha_6 t_6 y dF_6$
$0,38446 E_n R^4$	$0,6518319 E_6 r^4$	$-6,790217 \cdot 10^{-4} E_n R^3$	$-8,644595 \cdot 10^{-4} E_6 r^3$
a_6^*	a_n^*	$\epsilon_6^* \frac{1}{M}$	$\epsilon_n^* \frac{1}{M}$
$0,564334 \cdot 10^{-3}$	$2,3809535 \cdot 10^{-2}$	$-1,454828 \cdot 10^{-2}$	$-9,792644 \cdot 10^{-2}$

Таблица 4
Напряжения от нагрузки в ролике диаметром 300 мм

D, м	d_n , м	d_6 , м	Марка стали	$[\sigma_n]$, МПа	σ_n , МПа	$[\sigma_6]$, МПа	σ_6 , МПа	$\frac{E_6}{E_n}$	$\frac{E_n}{E_6}$
0,3	0,25	0,15	ХМФ	490	103	308	87,3	1,01658	0,98369
Температурные напряжения									
Граница слоя	σ_n , МПа				σ_6 , МПа				
	Верхняя половина	Нижняя половина	Верхняя половина	Нижняя половина					
Верхняя	- 245,4	- 158,4	- 147,3	260,6					
Нижняя	- 142,0	- 687,1	118,0	- 152,8					
Суммарные напряжения									
Граница слоя	σ_n , МПа				σ_6 , МПа				
	Верхняя половина	Нижняя половина	Верхняя половина	Нижняя половина					
Верхняя	- 142,0	- 244,0	- 60,0	208,2					
Нижняя	- 59,2	- 790,0	170,4	- 240,0					

Таблица 5
Механические характеристики сечения ролика диаметром 270 мм

$\int_{(F_6)} E_6 dF_6$	$\int_{(F_n)} E_n dF_n$	$\int_{(F_6)} E_6 \alpha_6 t_6 F_6$	$\int_{(F_n)} E_n \alpha_n t_n F_n$
$1,978995 E_6 r^2$	$1,01388 E_n R^2$	$4,015113 \cdot 10^{-3} E_6 r^2$	$2,326177 \cdot 10^{-3} E_n R^2$
$\int_{(F_n)} E_n y^2 dF_n$	$\int_{(F_6)} E_6 y^2 dF_6$	$\int_{(F_n)} E_n \alpha_n t_n y dF_n$	$\int_{(F_6)} E_6 \alpha_6 t_6 y dF_6$
$0,4156209 E_n R^4$	$0,6577259 E_6 r^4$	$-6,872724 \cdot 10^{-4} E_n R^3$	$-8,283844 \cdot 10^{-4} E_6 r^3$

a_e^*	a_n^*	$\epsilon_e^* \frac{1}{M}$	$\epsilon_n^* \frac{1}{M}$
$3,424081 \cdot 10^{-3}$	$2,280587 \cdot 10^{-2}$	$-1,570679 \cdot 10^{-2}$	$-1,051373 \cdot 10^{-2}$

Таблица 6

Напряжения от нагрузки в ролике диаметром 270 мм

D , мм	d_n , мм	d_e , мм	Мар- ка стали	$[\sigma_n]$, МПа	σ_n , МПа	$[\sigma_e]$, МПа	σ_e , МПа	$\frac{E_e}{E_n}$	$\frac{E_n}{E_e}$
0,27	0,22	0,13	ХМФ	490	92,7	308	76,8	1,0165 8	0,9836 9
Температурные напряжения									
Граница слоя	σ_n , МПа				σ_e , МПа				
	Верхняя половина		Нижняя половина		Верхняя половина		Нижняя половина		
Верхняя	- 236,9		- 141,7		- 73,7		283,3		
Нижняя	- 127,4		- 693,8		170,7		-130,6		
Суммарные напряжения									
Граница слоя	σ_n , МПа				σ_e , МПа				
	Верхняя половина		Нижняя половина		Верхняя половина		Нижняя половина		
Верхняя	- 144,2		- 217,2		- 3,1		237,9		
Нижняя	- 51,9		- 786,5		216,1		-207,4		

При выбранных соотношениях геометрических и прочностных параметров напряжения в слоях не превышают допускаемых, за исключением узкого участка в зоне контакта слоев ($\sigma = -786,5$ МПа). Испытания показали, что это превышение не оказывает отрицательного влияния на стойкость роликов. Во внутреннем слое исключено циклическое изменение знака напряжений, что положительно сказалось на долговечности конструкции. Скачок напряжений в граничном слое невелик.

Выводы

1. В результате системных исследований установлено, что толщина наружного рабочего слоя из высоколегированного сплава может быть уменьшена на 20 мм при общей толщине стенке бочки ролика 75...90 мм.

2. Расчет напряженного состояния биметаллических роликов при эксплуатации показал, что напряжения в нижней половине роликов превосходят допускаемые.

3. Для повышения несущей способности внутреннего слоя ролика обосновали выбор для него стали 22ХМФЛ с более высокими механическими свойствами, чем у стали 20Л.

ЛИТЕРАТУРА

1. Разработать сплавы, усовершенствовать технологию изготовления и произвести промышленные испытания экспериментальных роликов с центробежнолитыми бочками для зоны вторичного охлаждения МНЛЗ: Отчет НИР / Днепроп. металлургич. ин-т (ДМетИ). – [Руков. Адамов И.В.]. – К522060006; № ГР 01860035487. – Д.: ДМетИ. – 1987. – 81 с.
2. Проведение испытаний с целью выявления причин отказов и разработка варианта подшипникового узла роликов МНЛЗ, обеспечивающего работоспособность в условиях повышенных нагрузок и температур: Отчет о НИР / Днепроп. металлургич. ин-т (ДМетИ). – [Руков. Кравченко Г.Ф.]. – 082401; № ГР 80027756. – Д.: ДМетИ. – 1980. – 60 с.
3. Адамов И.В. Сигма – фаза в сталях с 12 % хрома / И. В. Адамов, Ю. К. Бунина, Н. В. Сабанский, Л. А. Хитько // Теория и практика металлургии. – 1999. – № 4. – С. 54 – 56.
4. Адамов И. В. Выбор сплавов и разработка технологии центробежного литья биметаллических заготовок для роликов МНЛЗ / И. В. Адамов, Л. А. Хитько // Центробежное литье – прогрессивный технологический процесс производства труб и заготовок ответственного назначения: сб. науч. тр. / АН УССР. Ин-т пробл. литья. – К..– 1990 – С. 73 – 78.