

УДК 621.771.252

**Максименко О. П.  
Оробцев А. Ю.  
Самохвал В. М.  
Штода М. М.  
Марченко К. К.**

## **МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ИЗНОСА КАЛИБРОВ ВАЛКОВ ПРОВОЛОЧНОГО БЛОКА**

Исследование износа и стойкости деталей машин получило широкое отображение в известных трудах отечественных [1–3] и зарубежных [4, 5] ученых. Значительные работы в этой области выполнены и специалистами по обработке металлов давлением [6–8]. Известно, что износ в очаге деформации при прокатке зависит от физических, химических и механических условий в нем, а также от температуры металла на контакте. При оценке износа следует учитывать зависимость интенсивности изнашивания от физико-химического воздействия окружающей среды (вода, окалина, смазка), наличия значительных градиентов полей напряжений и деформаций, от кинематики процесса, включая скольжение в зоне контакта полосы с валками. Необходимо также иметь в виду и возможность появления дефектов в поверхностных слоях, а также неоднородность и анизотропность их свойств. Механизм изнашивания рабочего инструмента при прокатке включает такие составляющие как задиры поверхности, заедание, выкрашивание и истирание. Наиболее тяжелой формой повреждения поверхности рабочего инструмента при горячей прокатке является абразивный износ, включающий в себя все выше перечисленные составляющие, действие которых усугубляется высокой температурой деформации металла и подачей охлаждающей воды.

Несмотря на то, что валки проволочного блока изготавливают из твердосплавного материала, за время кампании работы ручьи калибров подвергаются значительной выработке. В связи с этим, целью настоящей работы является разработка методики экспериментального изучения износа валков проволочного блока среднесортно-проволочного стана 400/200 ПАО «ДМК». Обычно выработку калибров измеряют с помощью часового индикатора, точность которого составляет  $\pm 0,01$  мм. Известны также и другие способы измерения износа калибров [9].

Особенностью калибров проволочного блока является их относительно небольшие размеры. Поэтому с помощью часового индикатора удастся измерить величину износа только в средней части калибра. Опыты показывают, что в ряде случаев, максимальный износ возникает в стороне от центральной части калибров. В этих условиях возникает задача определения выработки калибров по всей длине его поперечного сечения. Решение этой задачи было достигнуто путем разработки оптико-светового метода изучения выработки калибров валков и создания специального измерительного устройства.

Целью работы является обоснование применения методики измерения износа валков с использованием оптико-светового стенда и анализ особенностей износа калибров валков проволочного блока.

В качестве измерительного устройства использовали оптико-световой стенд, показанный на рис. 1. Установка включает источник света, увеличительные линзы, экран и фотоаппарат для фиксации изображения. При изучении износа ручьев калибра валок располагают между источником света и линзой на расстоянии фокуса от последней. В ручей калибра устанавливают шаблон и с помощью специального приспособления строго фиксируют его положение. При включении света на экране стенда возникает увеличенное изображение зазора между дном ручья и шаблоном (рис. 1). Процесс измерения износа калибра включает две стадии. На первом этапе на экране получают обратное (перевернутое) изображение просвета между ручьем нового (до установки в клеть) валка и шаблона. Заметим, что этот

просвет, в результате действия линзы, в шесть раз превышает реальный. Затем полученное на экране изображение фотографировали совместно с эталоном длины (специальная измерительная линейка для масштабирования) и с помощью компьютера определяли размеры реального просвета между ручьем калибра нового валка и шаблоном. На втором этапе выполняли те же действия, но для отработавшего кампанию валка. Разница размеров конечного и начального просвета между ручьем и шаблоном представляет картину износа калибра в поперечном сечении валка. На рис. 2 и 3 приведены фотографии зазоров между выработанными калибрами валков и шаблонами десяти клетей проволочного блока, а также микрорельеф поверхности вываленных валков. Цифрами на фото отмечены величины зазоров на указанных участках поперечного сечения калибра. Заметим, что в первых семи клетях проволочного блока валки имеют по два одинаковых калибра. В остальных трех клетях каждый из валков имеет по четыре калибра. При проведении опытов в первой группе клетей использовали только один калибр, на валках которых было прокатано 2756 т металла, в 8–10 клетях прокатку осуществляли в двух калибрах с тоннажем в 1350 т и 1406 т.

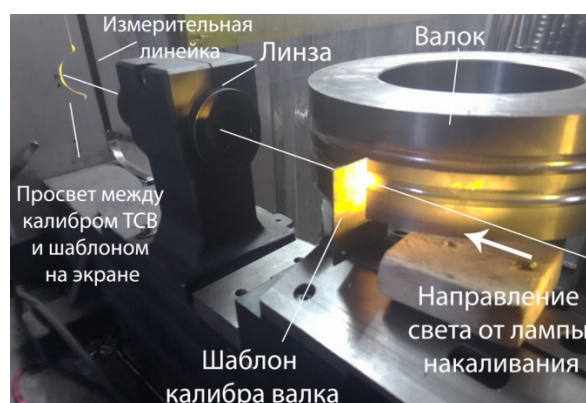


Рис. 1. Стенд с валком, шаблоном и изображением зазора

В табл. 1 приведены условия деформации и размеры калибров валков, а также среднее давление и усилие прокатки по клетям проволочного блока.

Таблица 1

Размеры калибров, режим деформации и сила прокатки при производстве катанки диаметром 5,5 мм в проволочном блоке

№ модуля	Размеры калибров, мм		Зазор (мм) по буртам g	Размеры раскатов, мм		Среднее давление, МПа	Сила прокатки, кН
	Vk	hвр		hi	bi		
				17,2	17,2		
1	23,65	4,6	1,94	11,14	20,65	284,96	92,59
2	13,83	6,14	1,51	13,74	13,79	291,08	72,16
3	18,89	3,5	1,85	8,85	16,97	309,57	77,56
4	11,45	4,95	1,13	11,03	11,03	309,47	56,51
5	16,85	2,7	1,22	6,62	13,9	317,99	60,47
6	8,97	3,7	1,36	8,66	8,76	307,71	42,40
7	13,56	2,1	1,06	5,26	10,97	304,99	40,64
8	7,27	2,92	1,11	6,95	6,95	299,21	29,32
9	10,24	1,6	0,99	4,19	8,75	300,58	28,57
10	5,76	2,18	1,21	5,57	5,57	286,29	19,63

Прежде чем анализировать результаты исследования, приведенные на рис. 2 и 3, оценим точность измерения выработки валков с помощью оптико-светового стенда в сравнении с показаниями часового индикатора. В обоих случаях замеры выполняли по центру калибра после кампании работы валков.

Результаты измерения износа во всех клетях проволочного блока приведены в табл. 2–3.

Таблица 2

Результаты измерения износа калибров валков оптико-световым методом

Ручьи калибра	№ калибра	Номер клетки проволочного блока									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
верхний	1	0,32	0,23	0,59	0,1	0,24	0,05	0,24	0,09	0,11	0,11
	2	0,32	0,28	0,39	0,07	0,27	0,14	0,28	0,10	0,13	0,13
	3								0,12	0,12	0,10
	4								0,05	0,11	0,11
нижний	1	0,36	0,30	0,44	0,14	0,22	0,13	0,31	0,12	0,12	0,10
	2	0,32	0,29	0,40	0,07	0,32	0,13	0,34	0,12	0,13	0,10
	3								0,11	0,11	0,10
	4								0,08	0,13	0,10

Таблица 3

Результаты измерения износа калибров валков часовым индикатором

Ручьи калибра	№ калибра	Номер клетки проволочного блока									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
верхний	1	0,34	0,33	0,36	0,11	0,28	0,07	0,21	0,06	0,09	0,05
	2	0,32	0,28	0,54	0,22	0,18	0,08	0,29	0,07	0,12	0,06
	3								0,09	0,10	0,02
	4								0,06	0,10	0,03
нижний	1	0,32	0,34	0,35	0,11	0,33	0,14	0,31	0,06	0,08	0,01
	2	0,38	0,33	0,44	0,19	0,28	0,10	0,44	0,10	0,11	0,0
	3								0,08	0,05	0,01
	4								0,03	0,09	0,02

Проведем статистический анализ полученных данных. Для этого с помощью критерия Стьюдента [10] проверим принадлежность приведенных в табл. 2 и 3 выборок одной совокупности, т. е. установим существенно ли среднее значение результатов измерений, полученные с помощью оптико-светового стенда  $\bar{X}_c$  и часового индикатора  $\bar{X}_u$ , различаются между собой или же это различие незначимо.

Для случая, когда проверяется соответствие между средними значениями выборок, критерий Стьюдента определяется:

$$t = \frac{\bar{X}_c - \bar{X}_u}{S_{\text{сум}} \sqrt{\frac{1}{n_c} + \frac{1}{n_u}}}. \quad (1)$$

Среднеквадратическое отклонение  $S_{\text{сум}}$  для обеих выборок рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{сум}} = \left( \frac{\sum x_{ic}^2 + \sum x_{iu}^2}{n_c + n_u - 2} \right)^{0,5}, \quad (2)$$

где  $n_c$  и  $n_u$  – объемы выборок измеряемых стендом и индикатором;

$\sum x_{ic}^2$  и  $\sum x_{iu}^2$  – суммы квадратов разностей, относительно среднего значения выборки.

Объемы выборок, согласно данным табл. 2–3, составляют  $n_c = n_u = 52$ .

Среднеарифметические значения выборок:

$$\bar{X}_c = \frac{\sum X_{ic}}{n_c} = 0,188; \quad \bar{X}_u = \frac{\sum X_{iu}}{n_u} = 0,175.$$

Сумма квадратов разностей:

$$\Sigma x_{ic}^2 = \Sigma (X_{ic} - \bar{X}_c)^2 = 0,662; \quad \Sigma x_{iu}^2 = \Sigma (X_{iu} - \bar{X}_u)^2 = 0,944.$$

Тогда

$$t = \frac{0,188 - 0,175}{\left( \frac{0,662 + 0,944}{102} \right)^{0,5} \sqrt{\frac{1}{52} + \frac{1}{52}}} = 0,523.$$

Табличное (критическое) значение критерия Стьюдента с надежностью  $P = 0,99$  и степенью свободы  $k = n_c + n_u - 2 = 102$  составляет  $t_{кр} = 2,62$ . Сравнивая расчетное и критическое значения  $t$ , приходим к выводу, что с большой степенью надежности результаты измерений, выполненные с помощью оптико-светового стенда, существенно не отличаются от показаний часового индикатора, т. е. точность измерения износа калибров обеими приборами является достаточно близкой. Аналогичные результаты были получены при сравнении дисперсий обеих выборок с помощью критерия Фишера [10, 11]. Следует также заметить, что показания оптико-светового стенда были проверены на нормальность распределения и установлено их соответствие кривой Гаусса.

Выполненный статистический анализ показывает, что оптико-световой метод можно уверенно применять для измерения износа калибров валков и получать данные не только по центру ручья, но и по всему периметру сечения.

Проанализируем результаты измерения износа валков, представленные на рис. 2 и 3 и в табл. 4. Как видно, в первых трех клетях наблюдается практически равномерный износ калибров от 0,2 до 0,3 мм. На поверхности ручьев проявляется абразивный и осповидный износ, особенно в первых двух клетях, а также имеет место начальная сетка термического износа. На валках второй клетки наблюдается резкий переход от гладкой поверхности к шероховатой с очертаниями чередующихся выступов и впадин, что возможно связано с неполным заполнением калибра.

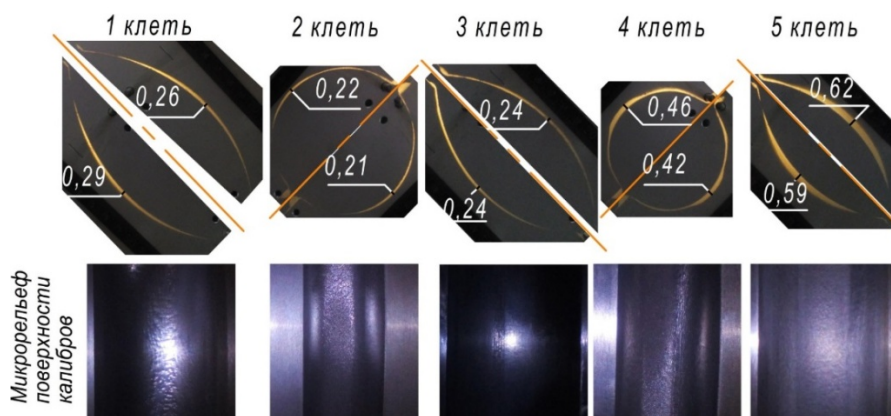


Рис. 2. Фотографии зазоров между ручьями верхнего и нижнего валков и шаблонами первых 5-ти клеток проволочного блока после кампании работы

Валки четвертой клетки имеют интенсивный износ по дну калибра. Наиболее существенный износ поверхности валков наблюдается в пятой клетке, достигая значений 0,5–0,6 мм, хотя поверхность остается гладкой, осповидность ее практически отсутствует. Существенная выработка поверхности валков пятой клетки, по-видимому, связана со значительным средним давлением металла на валки в этом проходе и скольжением металла в очаге деформации.

В шестой клетке минимальный износ расположен вблизи вертикальной линии калибра по обе стороны от нее, что предположительно связано со сваливанием раската в калибре. Минимальный износ валков этой клетки наблюдается вблизи разъема калибра и составляет 0,25–0,27 мм.

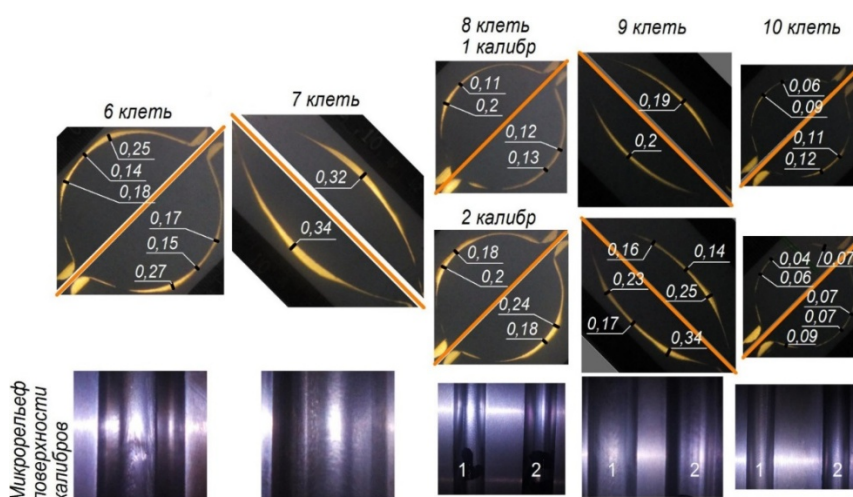


Рис. 3. Фотографии зазоров между ручьями валков и шаблонами последних пяти клеток проволочного блока

Таблица 4

Результаты исследования износа калибров валков проволочного блока стана 400/200

Черновые клетки								
Износ, мм	валок	№ клетки						
		1	2	3	4	5	6	7
		верхний	0,26	0,24	0,24	0,46	0,62	0,14(0,25)
нижний	0,29	0,21	0,24	0,53	0,59	0,15(0,27)	0,34	
Чистовые клетки								
Износ, мм	№ калибра	Валок	Номер клетки					
			8	9	10			
	1	верхний	0,11(0,2)		0,19	0,09(0,06)		
		нижний	0,11(0,12)		0,2	0,11(0,12)		
	2	верхний	0,18(0,2)		0,16 (0,25)	0,04(0,07)		
нижний		0,18(0,2)		0,17 (0,34)	0,07(0,09)			

Анализируя износ рабочего инструмента 8–10 клеток, предварительно отметим, что валки имеют по четыре одинаковых калибра. На рис. 3 эти калибры показаны под номерами 1 и 2. Вначале работали калибры № 1 и на них прокатано 1350 т. Затем деформацию металла осуществляли в калибрах № 2, на них произведено 1406 т. Хотя объем металла, прокатанный в обоих калибрах, был примерно одинаковым, износ вторых калибров был существенно выше по сравнению с первыми. Так, максимальная выработка второго калибра 9-ой клетки составила 0,34 мм, а первого только 0,2 мм. По-видимому, такое различие в характере их износа можно объяснить определенной наследственностью, связанной с прокаткой металла в предыдущих клетях. До поступления подката в первые калибры он прокатывался на относительно новых валках первых семи клеток, а ко вторым калибрам металл поступал после деформации в частично подношенных валках с несколько искаженной геометрией профиля. Следует также подчеркнуть, что различие в износе верхней и нижней половины калибра у валков 8–10 клеток практически незаметно, а микрорельеф их поверхности после кампании работы оставался гладким, без заметных изъянов и осповидности. Это следует из рассмотрения фотографий рис. 3.

На износ калибров валков определенное влияние оказывает также величина зазора между валками. При увеличении этого зазора вероятность сваливания раската в калибре возрастает, что отражается на его выработке.

## ВЫВОДЫ

Разработана новая методика изучения износа валков проволочного блока, основанная на применении оптико-светового стенда и позволяющая оценить выработку ручья калибра по всему периметру сечения его.

Проведен статистический анализ точности предложенного способа оценки износа в сравнении с показаниями часового индикатора. Проведенное исследование показало, что глубина износа калибров распределена неравномерно и существенно зависит от характера изменения среднего давления металла на валки по клетям проволочного блока.

При прокатке катанки диаметром 5,5 мм наиболее подвержены выработке калибры четвертой и пятой клетей, где преобладает абразивный износ. В первых двух клетях он приобретает вид осповидности.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И. В. *Трение и износ* / И. В. Крагельский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
2. *Трение, изнашивание и смазка : справочник. В 2-х кн.* / Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина. – М. : Машиностроение, 1979. – 358 с.
3. Дроздов Ю. В. *Противозадирная стойкость трущихся тел* / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Арчegov, В. И. Смирнов. – М. : Наука, 1981. – 139 с.
4. Тейбор Д. *Износ. Краткий исторический обзор : пер. с англ.* / Д. Тейбор // *Проблемы трения и смазки.* – М. : Мир, 1974. – № 4. – С. 6–16.
5. Хаккен Г. *Синергетика : пер. с нем.* / Г. Хаккен. – М. : Мир, 1980. – 440 с.
6. Воронцов Н. М. *Эксплуатация валков обжимных и сортовых станов* / Н. М. Воронцов, В. Т. Жадан, Б. Я. Шнееров и др. – М. : Metallurgija, 1973. – 288 с.
7. Чекмарев А. П. *Износ прокатных валков* / А. П. Чекмарев, Р. А. Машиковцев. – М. : Metallurgizdat, 1955. – 147 с.
8. Быстров В. А. *Условия эксплуатации и износ валков прокатного стана горячего металла* / В. А. Быстров, П. К. Дьяков, А. Г. Уманец // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 2014. – № 5. – С. 24–29.
9. Мур Д. *Основы и применения трибоники : пер. с англ.* / Д. Мур. – М. : Мир, 1978. – 487 с.
10. Румшицкий Л. З. *Математическая обработка результатов эксперимента : справочное пособие* / Л. З. Румшицкий. – М. : Наука, 1971. – 192 с.
11. Шенк Х. *Теория инженерного эксперимента* / Х. Шенк. – М. : Мир, 1972. – 381 с.

#### REFERENCES

1. Kragel'skij I. V. *Trenie i iznos* / I. V. Kragel'skij. – 2-e izd., pererab. i dop. – M. : Mashinostroenie, 1968. – 480 s.
2. *Trenie, iznashivanie i smazka : spravochnik. V 2-h kn.* / Pod red. I. V. Kragel'skogo i V. V. Alisina. – M. : Mashinostroenie, 1979. – 358 s.
3. Drozdov Ju. V. *Protivozadirnaja stojkost' trushhihsja tel* / Ju. N. Drozdov, V. G. Archegov, V. I. Smirnov. – M. : Nauka, 1981. – 139 s.
4. Tejbor D. *Iznos. Kratkij istoricheskij obzor : per. s angl.* / D. Tejbor // *Problemy trenija i smazki.* – M. : Mir, 1974. – № 4. – S. 6–16.
5. Hakken G. *Sinergetika : per. s nem.* / G. Hakken. – M. : Mir, 1980. – 440 s.
6. Voroncov N. M. *Jekspluatacija valkov obzhimnyh i sortovyh stanov* / N. M. Voroncov, V. T. Zhadan, B. Ja. Shneerov i dr. – M. : Metallurgija, 1973. – 288 s.
7. Chekmarev A. P. *Iznos prokatnyh valkov* / A. P. Chekmarev, R. A. Mashkovcev. – M. : Metallurgizdat, 1955. – 147 s.
8. Bystrov V. A. *Uslovija jekspluatacii i iznos valkov prokatnogo stana gorjachego metalla* / V. A. Bystrov, P. K. D'jakov, A. G. Umanec // *Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija.* – 2014. – № 5. – S. 24–29.
9. Mur D. *Osnovy i primenenija triboniki : per. s angl.* / D. Mur. – M. : Mir, 1978. – 487 s.
10. Rumshiskij L. Z. *Matematicheskaja obrabotka rezul'tatov jeksperimenta : spravochnoe posobie* / L. Z. Rumshiskij. – M. : Nauka, 1971. – 192 s.
11. Shenk H. *Teorija inzhenernogo jeksperimenta* / H. Shenk. – M. : Mir, 1972. – 381 s.

Максименко О. П. – д-р техн. наук, проф., зав. каф. ОМД ДГТУ;

Оробцев А. Ю. – канд. техн. наук, нач. техн. управл. ПАО «ДМК»;

Самохвал В. М. – канд. техн. наук, доцент ДГТУ;

Штода М. Н. – канд. техн. наук, доцент ДГТУ;

Марченко К. К. – аспирант ДГТУ.

ДГТУ – Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское.

ПАО «ДМК» – Публичное акционерное общество «Днепропетровский металлургический комбинат», г. Каменское.

E-mail: [omd@dstu.dp.ua](mailto:omd@dstu.dp.ua) ; [volsamokhval@gmail.com](mailto:volsamokhval@gmail.com); [makshtoda@gmail.com](mailto:makshtoda@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 11.01.2019 г.