



УДК 669.187.2.002.2

## СОВРЕМЕННЫЕ ВАЛКИ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ. ТРЕБОВАНИЯ, МАТЕРИАЛЫ И СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА \*

Л. Б. Медовар, А. К. Цыкуленко, В. Е. Шевченко

Приведены данные о состоянии современного производства рабочих и опорных валков различных типов станов. Проанализированы существующие направления в выборе материалов валков и технологии их производства. На основании проведенного анализа показана устойчивая тенденция использования композитных валков с рабочим слоем из высоколегированных материалов.

Data are presented about the status in production of working and supporting rolls of different types of mills. Existing directions in the selection of roll materials and technology of their production are analyzed. The steady tendency in using composite rolls with a working layer made from high-alloyed materials is stated on the basis of the analysis.

**Ключевые слова:** прокатные станы; рабочий слой; высокохромистые валки; быстрорежущая сталь; карбидная фаза; износ рабочей поверхности; рабочие валки

Валки прокатных станов являются одним из основных элементов, от которых в решающей степени зависят производительность прокатки, качество выпускаемой продукции и, в конечном счете, ее стоимость. Несмотря на сравнительно простую конструкцию валка, условия его эксплуатации таковы, что валок находится в сложном напряженном состоянии, вызывающем возникновение в нем различных дефектов, препятствующих выполнению предназначенных ему функций. Однако до настоящего времени нет сколько-нибудь строгой теории, позволяющей на основе данных о параметрах прокатки определить необходимые свойства материала валка. Все большее признание находит тот факт, что свойства валка и свойства материала, из которого он изготовлен, суть разные категории [1]. Даже такое фундаментальное свойство как твердость однозначно не определяет работоспособность валка. Твердость поверхности бочки валков, изготовленных из разных по классу материалов, может быть одинаковой, а долговечность этих валков в идентичных условиях экс-

плуатации будет существенно различаться. То же самое можно отметить и в отношении других свойств, обычно принимаемых во внимание при выборе материала для прокатных валков. Например, данные об усталостной прочности материала, полученные при испытании стандартных небольших образцов, зачастую оказываются совершенно бесполезными для практики, поскольку не учитывают влияния ни размеров валков, ни концентраторов напряжений, ни окружающей среды, ни объемного напряженного состояния и еще множества других факторов, воздействующих на валок при прокатке. Поэтому изготовители и прокатчики при выборе материала для валков пользуются в основном статистическими данными, накопленными в процессе эксплуатации валков в конкретных условиях.

Условия прокатки, определяющие эксплуатационное качество валка, существенно различаются в зависимости от сортамента проката, конструкции стана, расположения клетки в стане и многих других факторов. Валки могут быть рабочие и опорные, горячей и холодной прокатки, листовые и сортовые и располагаться в чистовых и черновых клетях. Прокатные станы могут быть непрерывные и реверсивные, многовалковые и обжимные, снабженные устройст-

\* По материалам зарубежной печати.



Таблица 1. Типичный химический состав и твердость рабочего слоя валков горячей прокатки

Материал	Содержание, %									Твердость, HSC
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	
IC	3,0...3,4	0,7...1,0	0,6...1,0	1,4...1,85	4,2...4,6	0,2...0,5	–	–	–	70...85
Adamite	0,7...2,5	0,5...1,0	1,0...1,5	1...2	0,5...2,0	< 1,0*	–	–	–	40...65
Высокохромистый чугун	2...3	0,5...1,0	0,5...1,5	15...25	0,5...1,5	0,5...1,5	–	–	–	73...83
Высокохромистая сталь	1,0...1,8	0,5...1,0	0,5...1,0	10...15	0,5...1,0	1...3	–	–	–	70...80
Полубыстрорежущая сталь	0,4...1,2	1,0...1,3	0,4...0,9	3...10	0,5...0,8	1,5...3,0	≤ 5	0,5...1,0	–	60...90
Быстрорежущая сталь	1,5...2,2	0,5...1,6	0,5...1,5	4...10	1...4	1...6	0...9	3...7	0...1,5	75...90

\*Или  $Mo + V + W + Nb = 0,5...1,0$  %.

вами для охлаждения и смазки валков или без оных. Все это создает большую гамму самых различных условий прокатки, в которых должен работать валок. Поэтому в различных клетях прокатного стана часто используются валки, изготовленные из разных материалов, обеспечивающие необходимую продолжительность прокатной кампании до остановки стана для осмотра и перешлифовки валков.

На основании вышеизложенного рассматривать материалы, применяющиеся при изготовлении валков, целесообразно в соответствии с назначением валков.

**Рабочие валки листовых станов горячей прокатки.** Эти валки одни из наиболее распространенных в прокатном производстве. Они работают в следующих условиях [2]:

нагрев от 80 до 600 °С за 1 с;

охлаждение до 80 °С за 4 с;

высокоскоростные ударные нагрузки каждые 2...3 мин (в результате удара концевых частей прокатываемой полосы);

абразивное истирание прокатываемой полосой;

контакт с опорным валком, через который при каждом обороте передается на валок усилие, необходимое для деформации полосы, вызывающее на глубине 5... 8 мм от поверхности рабочего валка максимальные напряжения;

переменные изгибающие нагрузки;

переменный крутящий момент;

периоды бездействия, когда температура может падать до 40... 50 °С;

окисление и образование окалины;

внезапные термические удары при аварийных остановках стана, когда валок контактирует с полосой, нагретой до температуры 1200 °С.

Традиционным материалом валков горячей прокатки является чугун, отбеленный слой ко-

торого имеет высокую твердость и износостойкость. Благодаря высокой теплопроводности и отличным литейным свойствам литые чугунные валки нашли широкое распространение при горячей прокатке. Сначала чугунные рабочие валки горячей прокатки состояли из отбеленного рабочего слоя, в котором весь углерод был связан в карбиды или находился в растворе, переходного слоя и сердцевины из серого чугуна. При этом химический состав всего валка был один и тот же. Изготавливали эти валки литьем по технологии, обеспечивающей ускоренное охлаждение наружного слоя, в результате которого в нем происходил отбел чугуна. В дальнейшем (более 50 лет назад) стали применять чугунные валки с отбеленным слоем, в котором содержалось контролируемое количество мелкодисперсных частиц свободного графита. В англоязычной технической литературе такой чугун называется «Indefinite chill» (IC), «Ni-hard» или «Nickel grain». Типичный химический состав такого чугуна и твердость бочки изготовленных из него валков приведены в табл. 1. Чугун имеет повышенные теплопроводность и вязкость. Высокое содержание карбидной фазы и присутствие мелкодисперсного свободного графита в легированной хромом и никелем мартенситно-бейнитной матрице обеспечивает ему хребтообразную структуру с повышенным сопротивлением ударной нагрузке [2, 3].

Одно время валки IC применялись во всех случаях горячей прокатки, особенно для плоского проката. С появлением новых технологий изготовления валков и высоколегированных материалов валки IC стали вытесняться: в черновых клетях непрерывных станов и в обжимных станах — валками из высокохромистой и полубыстрорежущей стали, а в первых чистовых клетях — валками из высоко-



хромистого чугуна или стали и из быстрорежущей стали. Только в последних чистовых клетях станов горячей прокатки валки IC остаются вне конкуренции из-за высокого сопротивления прихватыванию полосы к валкам, стойкости против растрескивания и выкрашивания, что обеспечивает высокое качество поверхности проката.

Улучшение качества чугунных валков с отбеленным слоем продолжается в направлении повышения износостойкости путем совершенствования технологии их изготовления. Тщательный контроль параметров отливки валков, поддержание необходимого баланса между элементами-графитизаторами (углерод, никель, кремний) и карбидообразующими элементами (хром, молибден) позволили снизить пределы твердости этих валков с 70...85 до 75...80 HSC и диспергировать карбидную и графитную фазы. В свою очередь, это обеспечило повышение наработки на валок до 40 %, увеличило стойкость против выкрашивания, что позволило улучшить качество поверхности листа [3]. Другим эффективным средством повышения износостойкости чугунных валков с отбеленным слоем явился ввод экзогенных карбидов вольфрама, ванадия, ниобия или соответствующих карбидообразующих элементов при отливке рабочего слоя валков. Это обеспечило повышение наработки на валок на 45 % при использовании этих валков в последних чистовых клетях станов горячей прокатки и позволило продлить на 50 % кампанию на стане Стеккеля, валки которого работают в условиях, соответствующих одновременно условиям работы в чистовых и черновых клетях непрерывных станов горячей прокатки [2, 4].

Условия работы валков в черновых и чистовых клетях существенно различаются. Соответственно различаются и требования, предъявляемые к материалу валков. Основное назначение черновых клетей — обжатие заготовки до нужного размера за минимальное количество проходов. Поэтому коэффициент захвата валков должен быть по возможности максимальным. В свою очередь, коэффициент захвата зависит от материала валков. Известно, что этот коэффициент увеличивается с уменьшением содержания карбидов и углерода в материале валков и их твердости [5, 6]. Необходимость прокатки с большими обжатиями обуславливает применение больших усилий, что предъявляет к материалу валков повышенные требования по вязкости разрушения, в том

числе и от механических и термических перегрузок вследствие аварийных ситуаций на стане, его внезапной остановки и т. п. Эти условия вызвали применение в черновых клетях валков из материалов пониженной твердости с относительно низким содержанием карбидов и углерода. В частности, довольно широкое распространение в черновых клетях непрерывных и полунепрерывных станов получили валки из литейной стали «Adamite» (табл. 1) [5 – 7]. По мере увеличения коэффициента захвата валковые материалы располагаются в ряд: чугун с шаровидным графитом, высокохромистый чугун, чугун «Indefinite chill», высокохромистая сталь, «Adamite», полубыстрорежущая сталь, высокоуглеродистая (до 0,8...0,9 % C) хромомолибденовая (до 0,5 % Cr и до 0,2 % Mo) литая или ковкая сталь. Несмотря на несколько больший коэффициент захвата валков из материала «Adamite», они были вытеснены в черновых клетях валками из высокохромистой стали, имеющими более высокую износостойкость и сопротивление образованию разгарных трещин и обеспечивающими более высокое качество поверхности проката и большую длительность прокатной кампании (табл. 2).

Сравнительно низкая износостойкость валков из материала «Adamite» обусловила разработку американской компанией «National Roll» разновидности этого материала с улучшенной износостойкостью за счет введения в нее карбидов ванадия, ниобия и вольфрама более твердых, чем карбиды железа. Этот материал, получивший название BIO сталь, имеет твердость 55...65 HSC, его износостойкость в 1,5–2 раза выше, чем стали «Adamite» и потому он используется для валков чистовых клетей [8].

В конце 60-х годов валки из высокохромистых материалов (чугуна и стали) начали вытеснять валки IC и адамитовые валки в клетях с более высокой температурой прокатываемой заготовки и соответственно более высокой температурой нагрева валков. Авторы работы [2] объясняют это следующим. В процессе циклического нагрева поверхности валка до 600 °C и охлаждения ее до 80 °C в поверхностных слоях возникают переменные напряжения то сжимающие (при нагреве), то растягивающие (при охлаждении), которые могут превышать предел текучести материала. В результате происходит усталостное растрескивание поверхностных слоев валка и его микровыкрашивание. Это ухудшает качество



Таблица 2. Сравнительная характеристика эксплуатационных свойств валков черновых клетей листовых прокатных станов горячей прокатки из различных материалов [5]

Материал	Твердость, <i>HSC</i>	Эксплуатационные свойства					
		Захват	Износостойкость	Сопротивление образованию разгарных трещин	Качество поверхности	Длительность кампании	Безопасность в эксплуатации
Кованая Ст–Мо сталь (0,4...0,8 % С)	28...38	Отличный	Плохая	Плохое	Плохое	Плохая	Удовлетворительная
Литая Ст–Мо сталь (0,5...0,9% С)	32...42	»	Удовлетворительная	»	»	»	»
ICDP	60...70	Хороший	Плохая	Хорошее	Удовлетворительное	»	Хорошая
Чугун с шаровидным графитом	50...70	Плохой	Достаточная	Достаточное	»	Достаточная	Достаточная
Adamite (1,2...1,7 % С)	40...55	Хороший	»	»	Достаточное	»	Удовлетворительная
Высокоуглеродистая сталь (1,5...1,9 % С; 0,7...1,5 % Cr; 0,1...0,5 % Mo)	35...50	Удовлетворительный	»	Удовлетворительное	Удовлетворительное	»	»
Высокохромистый чугун	65...78	»	Удовлетворительная	Достаточное	Достаточное	Удовлетворительная	Хорошая
Высокохромистая сталь	68...78	Хороший	Хорошая	Удовлетворительное	Хорошее	Хорошая	»
Полубыстрорежущая сталь	70...90	Отличный	Отличная	Отличное	Отличное	Отличная	»

поверхности вала и соответственно качество поверхности проката и вынуждает производить замену валков. Более высокий предел текучести высокохромистых материалов при высокой температуре препятствует их пластической деформации при циклической нагрузке, повышая предел усталости и уменьшая склонность к поверхностному растрескиванию. В результате длительность прокатной кампании без замены валков увеличивается. Интересно отметить, что успех высокохромистых валков был несколько неожиданным. Их выбор поначалу был обусловлен успешным применением высокохромистого чугуна в промышленности абразивных материалов. И только после первых положительных результатов использования высокохромистых валков были проведены (в 70-х годах) серьезные исследования в области оптимизации состава и режимов термической обработки высокохромистых материалов, которые позволили повысить их предел текучести и вязкость разрушения. Сейчас оптимальной твердостью валков из высокохромистого чугуна считается твердость 780...815 Ld [2].

В свете вышеизложенного становится ясно, почему валки из высокохромистого чугуна пошли на замену валков IC прежде всего в первых чистовых клетях, а валки из высоко-

хромистой стали с меньшим содержанием карбидов и углерода, обеспечивающие более высокий коэффициент захвата, — на замену адамитовых валков в черновых клетях прокатных станов горячей прокатки.

Высокохромистый чугун прокатных валков содержит обычно 20...30 % эвтектических карбидов типа  $M_7C_3$ . Матрица представляет собой отпущенный мартенсит с распределенными в нем тонкодисперсными вторичными карбидами. Такая структура обеспечивает существенное повышение износостойкости прокатных валков из этого материала. В результате наработка на валок существенно увеличивается, составляя обычно в первых клетях чистовой группы в среднем 5000...6000 т/мм, что примерно в 1,5 – 2 раза больше, чем у валков IC [3, 9].

Высокохромистая валковая сталь имеет такую же износостойкость, что и высокохромистый чугун, но более высокие прочность и вязкость разрушения и потому используется в более нагруженных условиях. Она содержит обычно 5...12 % карбидов типа  $M_7C_3$ . Матрица — отпущенный мартенсит с вторичными карбидами.

Развитием высокохромистых валковых материалов явились так называемые валковые быстрорежущие (БРС) и полубыстрорежущие



**Таблица 3. Содержание карбидной фазы, морфология и твердость карбидов в различных материалах валков горячей прокатки [1, 6, 11, 12]**

Материал валка	Карбидная фаза		
	Общее содержание, %	Морфология карбидов	Твердость карбидов, HV
Чугун	40...50	Fe <sub>3</sub> C	1340
Чугун «Indefinite chill»	25...40	M <sub>3</sub> C	850...1100
Высокохромистый чугун	18...28	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	1200...1600
Быстрорежущая сталь	5...15	M <sub>6</sub> C	1100...1650
		M <sub>2</sub> C	2000...2400
		MC	2400...3200
Высокохромистая сталь	5...10	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	1200...1600
		Mo <sub>2</sub> C	1400...1700

(ПБРС) стали, в которых хром частично заменен такими карбидообразующими элементами, как молибден, вольфрам, ванадий, ниобий. С момента первого появления этих материалов для валков горячей прокатки прошло не более 10 лет, но они довольно быстро завоевали популярность благодаря своим исключительно высоким эксплуатационным свойствам и их применение быстро расширяется. В настоящее время параллельно с промышленным использованием валков из этих сталей идет оптимизация их составов и режимов термической обработки, а также поиск оптимальных условий эксплуатации валков. Поэтому в литературе крайне редко приводятся конкретные составы этих сталей, чаще ограничиваются системой легирования, а содержание элементов приводится в очень широких пределах. В табл. 1 приведено минимальное и максимальное содержание элементов, наиболее часто встречающихся в литературе составов быстрорежущей и полубыстрорежущей сталей. Тем не менее, можно выделить три группы БРС [10], используемых для изготовления валков горячей прокатки. К первой группе относятся стали, разработанные на базе молибден-содержащих инструментальных быстрорежущих сталей с повышенным содержанием

углерода и ванадия. Карбидная фаза этих сталей представлена большим количеством карбидов типа M<sub>2</sub>C из-за высокого содержания молибдена или вольфрама. Ко второй группе относятся высокоуглеродистые ванадиево-молибденовые стали, в которых карбидная фаза состоит в основном из карбидов типа MC диаметром не более 30 мкм. Третью группу составляют высокохромистые стали с повышенным содержанием углерода, ванадия и молибдена. Полагают, что карбидная фаза этих сталей состоит в основном из карбидов типа M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>. Микроструктура быстрорежущих сталей, так же как и высокохромистых, представляет собой отпущенный мартенсит с карбидной фазой. Считается [1, 10], что именно карбидная фаза, ее количество, а главное морфология карбидов определяют эксплуатационные свойства валков. В свою очередь состав карбидной фазы, ее количество и морфология карбидов зависят от состава стали, содержания в ней углерода и карбидообразующих элементов, а также от условий кристаллизации металла (табл. 3). Карбиды такой сложнoleгированной стали, как быстрорежущая содержат в своем составе несколько карбидообразующих элементов, причем их соотношение в карбиде зависит от состава стали (табл. 4) и потому их твердость изменяется в определенных пределах и отличается от твердости простых карбидов стехиометрического состава:

Карбид	Fe <sub>3</sub> C	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	Mo <sub>2</sub> C	WC	NbC	VC	TiC
HV	1340	1600	1600	2100	2400	2900	3200

Более того, соотношение объемной доли карбидов в самой карбидной фазе БРС определяется [7] составом стали (табл. 5).

Как видим, количество карбидной фазы в быстрорежущих сталях примерно то же, что и в высокохромистых, но оно существенно ниже, чем в чугунах. Однако твердость этих карбидов намного выше, что и определяет в конечном счете свойства стали. Хотя по твердости валковые материалы не очень сильно разнятся между собой, другие их свойства, особенно

**Таблица 4. Типичный состав эвтектических карбидов в быстрорежущей стали валков горячей прокатки [7, 9]**

Карбид	Содержание, %				
	V	W	Mo	Cr	Fe
MC	71...87	1,5...5,5	2,5...4,8	3...7	2,0...2,9
M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	8,5...9,8	4,2...8,0	5,9...13,0	26...35	44...45
M <sub>6</sub> C	5,7	24...38	23...40	4,3...8,6	21...29
M <sub>3</sub> C	2,9	10	7	18	62
M <sub>2</sub> C	10...20	0...20	20...60	13...20	10...20



износостойкость, существенно различны (табл. 6). В некоторых работах [12] стойкость валков против термического усталостного растрескивания поверхностных слоев оценивают фактором качества, который представляет собой интегральный параметр, суммирующий влияние отдельных физических и механических параметров. Более низкий коэффициент Пуассона и более высокая теплопроводность и особенно прочность при повышенных температурах при примерно одинаковых коэффициентах термического расширения и модуле упругости обеспечивают валкам из быстрорежущих сталей существенно больший фактор качества по сравнению с валками из высокохромистых материалов. Соответственно термическая усталость быстрорежущих валков и их поверхностное растрескивание, приводящее к микровыкрашиванию, наступает значительно позже, чем у валков из высокохромистых материалов. Более высокая износостойкость и стойкость против усталостного выкрашивания обеспечивают существенно более высокое эксплуатационное качество валков БРС, что обусловило их распространение в первых чистовых клетях станов горячей прокатки взамен валков из высокохромистого чугуна (табл. 7). Распространение валков БРС на другие клетки пока наталкивается на определенные трудности, что вынуждает принимать альтернативные решения. В частности, в черновых клетях непрерывных станов и в обжимных станах находят распространение валки ПБРС (см. табл. 1, 2). По системе легирования эти стали такие же, что и БРС, однако содержат меньшее количество углерода и карбидообразующих элементов. В результате количество карбидной фазы в этих сталях в

**Таблица 5. Объемная доля эвтектических карбидов (%) в быстрорежущих сталях различного состава**

Сталь	МС	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	M <sub>6</sub> C	M <sub>3</sub> C
А	7,9	3,7	–	–
В	7,1	–	1,6	4,2
С	13,4	2,1	–	–

два раза меньше, чем в быстрорежущих и обычно не превышает 10 % [11]. В полубыстрорежущих сталях сочетается высокая прочность и вязкость, а благодаря меньшему содержанию карбидной фазы валки из этой стали обеспечивают при прокатке больший угол захвата. Эти свойства валков ПБРС и обусловили их применение в черновых клетях взамен валков из высокохромистой стали, кроме того, наработка на валок в 1,5 – 2 раза больше [6]. Дискуссионным является также вопрос об использовании валков БРС в последних чистовых клетях станов горячей прокатки. Некоторые специалисты считают, что их применение здесь без соответствующих изменений технологии прокатки и реконструкции прокатного оборудования имеет существенно более низкую эффективность [20, 21]. Снижение эффективности применения валков из БРС в клетки F4 по сравнению с F2–F3 объясняется [20] более низкой температурой полосы и более высокой скоростью прокатки. Здесь также может наблюдаться гофрирование полосы, поэтому не рекомендуется применять эти стали в клетях, где толщина проката меньше 2,5 мм [17]. Имеющийся зарубежный опыт эксплуатации валков из БРС в станах горячей прокатки [20 – 24] показывает, что эффективность их использования зависит от конкретных условий эксплуатации. Отмечается,

**Таблица 6. Механические и физические свойства материала валков станов горячей прокатки [7, 11, 12 – 16]**

Материал	Физические свойства					Механические свойства				
	Коэф-фициент Пуассона	Теплопроводность, В/(м·К)	Модуль упругости E·10 <sup>-3</sup> , Н/мм <sup>2</sup>	Коэффициент расширения, α·10 <sup>-6</sup> /К	Фактор качества, ε	σ <sub>в</sub> , МПа		σ <sub>изг</sub> , МПа	K <sub>1с</sub> , МПа·м <sup>1/2</sup>	Индекс износостойкости
						+20 °С	+600 °С			
Кованая сталь	–	42,0	–	14,0	–	690...970	–	–	–	–
Отбеленный чугун	–	27,0	–	12,0	–	450	–	–	–	–
Чугун «Indefinite chill»	–	–	–	–	–	345...490	238	–	23...25	1
Высокохромистый чугун	0,30	20,0	170...220	13,0...14,1	3913	400...870	549	–	–	1,7
Высокохромистая сталь	–	–	200	–	–	650...800	–	–	–	1...2
Быстрорежущая сталь	0,27	25,5	220...235	14,0	5567	700...1100	700...800	1020...1228	23...26	3...7

$$\epsilon = \frac{(1 - \mu)\sigma_v}{E\alpha}$$



Таблица 7. Нарботка на валок (т/мм) из различных материалов в первых чистовых клетях станов горячей прокатки

Материал валка	Средние данные по клетям стана компании «Dofasco» [17, 18]					Обобщенные данные по клетям F1–F4 [7, 9, 16, 19]
	F1	F2	F3	F4	F5	
Чугун «Indefinite chill»	–	–	–	2230	3000	2800
Высокохромистый чугун	5600	6180	6190	3140	–	4500...10510
Быстрорежущая сталь	9050	9025	10360	6270	2580	8240...18320
СРС	34500	23400	–	–	–	29000

что валки БРС при своей выдающейся способности сопротивляться износу имеют в то же время определенные недостатки, которые необходимо учитывать при их эксплуатации. В частности, они могут быть склонны к неконтролируемому экспоненциальному окислению при высоких температурах [22], которое в отличие от контролируемого линейного окисления может приводить к нежелательным последствиям. Если тонкая однородная оксидная пленка считается желательной на поверхности валка, т. к. способствует уменьшению сил трения и улучшению сопротивления износу [22], то толстая и прочная пленка вызывает шелушение и огрубление поверхности валка, что приводит к увеличению силы трения при прокатке. В свою очередь, увеличение силы трения ведет к увеличению усилия при прокатке, а следовательно, к снижению долговечности валка. Поэтому для повышения эффективности работы валков БРС необходимо снижать их температуру, используя систему принудительного охлаждения [20, 22, 25].

Еще одной причиной огрубления поверхности и повышения коэффициента трения является неоптимальный состав БРС или неправильная термообработка валков из этой стали, при этом очень твердые карбиды распределяются в относительно мягкой матрице. Вследствие этого при прокатке, особенно в поздних чистовых клетях, происходит износ матрицы и выкрашивание карбидов [23].

Вероятность огрубления поверхности валков БРС и соответствующее повышение коэффициента трения при прокатке делают весьма целесообразной смазку прокатных валков БРС [15, 17, 22, 25].

Еще одной особенностью валков БРС является их чувствительность к ударным нагрузкам. В этом плане оказалась полезной замена литых опорных валков коваными в станах, использующих рабочие валки БРС [20]. Это позволило устранить растрескивание концевых участков валков, происходящее вследствие неравномерного износа опорных и рабочих валков, приводящего к концентрации

усилия при прокатке в концевой части валка и имеющего ударный характер.

Исторически сложилось так, что рабочие валки горячей прокатки (или их рабочий слой) имеют литую структуру. Этому способствовало то обстоятельство, что свои «конечные» свойства валок приобретал при кристаллизации металла или во время термической обработки при высокой температуре, соответствующей высокотемпературным условиям его эксплуатации. Использование чугуна в качестве материала для валков горячей прокатки также обусловило доминирующее положение литейных технологий для валков горячей прокатки.

Повышение эксплуатационных свойств рабочего слоя и увеличение изгибающих нагрузок в станах (в конце 80-х годов) потребовали улучшения вязкости сердцевин валка. Проблема была решена при использовании для сердцевин валка таких составов, которые обеспечивают формирование чугуна с шаровидным графитом или высокопрочного чугуна с хлопьевидным графитом. При этом оптимальные составы материалов рабочего слоя и сердцевин валка оказались разными. В связи с этим чугунные валки стали композитными по составу и отливаются с отдельной заливкой рабочего слоя и сердцевин чаще всего центробежным литьем. Чугун с шаровидным графитом имеет более высокий предел прочности (450... 530 МПа) по сравнению с высокопрочным чугуном с хлопьевидным графитом (320... 370 МПа), но его использование порождает некоторые проблемы совместимости с чугуном ИС.

Проблемы связаны с содержанием серы в чугуне. Если для регулирования объемной доли графита и его формы в чугуне «Indefinite chill» необходимо не менее 0,04 % серы, то для чугуна с шаровидным графитом такое содержание серы недопустимо из-за связывания магния в сульфиды MgS. В результате в зоне перемешивания металлов рабочего слоя и сердцевин образуются неблагоприятные структуры, склонные к хрупкому разрушению [2].



Валки с наружным слоем из чугуна IC и сердечником из высокопрочного чугуна с шаровидным или хлопьевидным графитом, получаемые центробежным литьем с разделной заливкой рабочего слоя и сердцевины, в англоязычной технической литературе получили название «Indefinite chill double poured» (ICDP). Они положили начало широкому использованию при горячей прокатке композитных валков. Композитные валки в наибольшей степени удовлетворяют разнообразным требованиям, предъявляемым к их различным частям: поверхностный (рабочий) износостойкий при высокой температуре слой, высоковязкий сердечник, износостойкие и стойкие против изгиба и среза шейки. Способы производства композитных валков горячей прокатки должны обеспечивать в поверхностном слое однородное распределение тонкодисперсных карбидов в мартенситной матрице с мелкозернистой структурой и необходимые свойства при высоких температурах; в сердечнике — отсутствие сплошной карбидной сетки и макросегрегаций при необходимой вязкости разрушения материала; шейки должны иметь соответствующие механические свойства после термической обработки по режимам, назначаемым для материала стержня. При этом в переходной зоне между поверхностным слоем и сердцевиной структура и свойства одного материала должны по возможности плавно переходить к структуре и свойствам другого материала, не вызывая эффекта «металлургического концентратора напряжений».

В отличие от центробежной отливки с сердцевиной из высокопрочного чугуна, разработанные в последние годы способы производства композитных валков предусматривают, как правило, использование в качестве стержня стальную поковку, на которую посредством наплавки, напыления или горячего изостатического прессования наносят поверхностный слой. Наибольшего распространения при производстве валков с поверхностным слоем из БРС получила наплавка жидким присадочным металлом с использованием индукционного нагрева — СРС (Continuous pouring cladding). Все большее применение находит также электрошлаковая наплавка с использованием жидкого и кускового присадочного металла [26, 27]. Применение дорогого процесса СРС связано исключительно с наплавкой БРС, тогда как электрошлаковая наплавка может быть экономически целесообразной и при использовании более дешевых наплавочных

материалов. Популярность этих процессов связана с возможностью получения гораздо более мелкодисперсной структуры матрицы и карбидной фазы, чем при центробежном литье. Высокие скорости кристаллизации металла и возможность заливки присадочного металла при температуре, близкой к ликвидусу, обеспечивают благоприятную морфологию высоколегированных карбидов и их равномерное распределение в матрице. В свою очередь, такая структура металла обеспечивает сверхвысокие эксплуатационные свойства прокатных валков (табл. 7), с лихвой оправдывающие затраты на их производство.

**Валки листовых станов холодной прокатки.** В отличие от рабочих валков горячей прокатки валки холодной прокатки приобретают свои «конечные» свойства в результате термической обработки, предусматривающей низкий отпуск. В силу этого необходимые высокие прочностные свойства и твердость валки холодной прокатки приобретают при существенно меньшем содержании углерода и легирующих элементов. Это обусловило широкое применение при изготовлении валков холодной прокатки поковок из легированной инструментальной стали.

Материал валков холодной прокатки должен обеспечивать [28]:

- прокаливаемость на глубину, требуемую условиями эксплуатации стана;

- достаточную поверхностную твердость, чтобы противостоять индентированию и ударам при эксплуатации;

- сопротивление высоким контактными нагрузкам, позволяющее избежать усталостного выкрашивания поверхности валка;

- высокое сопротивление коррозионному и абразивному износу поверхности;

- способность сохранять кривизну профиля и гладкость поверхности;

- сопротивление локальным воздействиям типа размягчения или термического растрескивания при аварийных ситуациях на стане или при поломке полосы;

- достаточную упругость и вязкость, чтобы свести к минимуму риск катастрофического разрушения в условиях аномального нагружения стана;

- способность сохранять хромовое покрытие на поверхности валка;

- высокую прочность сердцевины на кручение и изгиб при одновременно хорошей стойкости против усталости;





Таблица 8. Номинальный химический состав традиционных материалов рабочих валков широкополосных станов холодной прокатки

Материал валка	Содержание, %			Твердость, <i>HV</i>	Диаметр валков, мм	Год начала применения
	C	Mo	Cr			
Кованая сталь (2 % Cr)	0,8	0,2	1,8	790...860	25...40	1940
Кованая сталь ЭШП (2 % Cr)	0,8	0,2	1,8	790...860	25...40	1970
Литая сталь ЭШП (2 % Cr)	0,8	0,2	1,8	790...860	40	1975
Высокохромистый чугун	2,8	2,0	18,0	730...800	75	1982
Кованая сталь (3 % Cr)	0,9	0,3	3,0	760...840	50...60	1988
Кованая сталь (5 % Cr)	0,9	0,2	5,0	760...840	45...50	1988

сопротивление сердцевины катастрофическому разрушению при аномальной нагрузке стана;

сопротивление шеек сплющиванию.

Традиционными материалами, удовлетворяющими этим требованиям, являются деформируемые высокоуглеродистые и инструментальные стали, полностью закалывающиеся на мартенсит, и высокохромистый (18 % Cr) отбеленный чугун (табл. 8, 9).

Низкая температура отпуски валков холодной прокатки препятствует снятию внутренних напряжений: сжатия на поверхности валка и растяжения в сердцевине, возникающих в процессе закалки валка. Суммируясь с рабочими напряжениями, эти напряжения могут привести к разрушению валка. Величина остаточных напряжений зависит от способа закалки. В отличие от канонической объемной закалки закалка с индукционного нагрева обеспечивает меньший уровень внутренних напряжений.

Опыт эксплуатации валков холодной прокатки показывает [28], что валки, закаленные с индукционного нагрева, меньше склонны к катастрофическому разрушению при аварийных ситуациях на стане по сравнению с объемно-закаленными валками. Для снижения уровня внутренних напряжений в объемно-закаленных валках их рекомендуется изго-

тавливать с центральным отверстием. Оно позволяет получить при закалке сжимающие напряжения также и в сердцевине валка и перераспределить растягивающие напряжения в область на середине радиуса бочки.

Толщина рабочего слоя валка определяется прокаливаемостью стали и минимально допустимой твердостью рабочей поверхности валка. Обычно твердость поверхности валка не бывает ниже 700 *HV*. С учетом этого глубина закаленного слоя по радиусу валка из различных материалов составляет [28]: сталь объемной закалки (2 % Cr) — 17 мм; сталь индукционной закалки (2 % Cr) — 20 мм; сталь (5 % Cr) — 25 мм; сталь (3 % Cr) — 28 мм; сталь глубокой прокаливаемости (5 % Cr) — 45 мм; высокохромистый чугун — 47 мм.

Считается, что микроструктура рабочего слоя стальных валков холодной прокатки должна представлять собой тонкодисперсную мартенситную матрицу с распределенными в ней карбидами размером порядка 1 мкм. Увеличение содержания в стали хрома от 2 до 5 % приводит к увеличению доли карбидов типа  $M_7C_3$  вместо  $M_3C$ , что обеспечивает более высокую стойкость валка против абразивного износа. Кроме того, повышение легированности стали влечет за собой увеличение ее отпускостойкости, что положительно ска-

Таблица 9. Номинальный состав инструментальных сталей для многовалковых станов (типа Сендзимир) и узкополосных станов холодной прокатки

Материал валка	Содержание, %					Твердость, <i>HRC</i>	Применение
	C	Mo	Cr	V	W		
Сталь VD4A	1,30	4,6	4,3	4,0	5,6	—	Рабочие валки многовалковых станов
Сталь ASP23	1,30	5,0	4,2	3,1	6,4	62...66	То же
Сталь D2	1,60	0,9	12,0	0,9	—	60...64	»
Сталь ZP	0,55	1,2	8,0	—	1,1	56...58 60...62	1-е промежуточные валки 2-е промежуточные валки
Сталь A2	1,0	1,0	5,0	0,3	—	56...58 60...62	1-е промежуточные валки 2-е промежуточные валки
Сталь MTC	0,40	1,4	5,3	0,4	—	—	Рабочие валки узкополосных станов
Сталь EN31	1,0	0,15	1,8	—	—	—	То же
Сталь ZP62	0,85	1,5	8,0	3,0	—	—	»



зывается на сопротивлении валка термоударам и локальному разупрочнению при аварийных ситуациях на стане. Поэтому в последнее время уделяется внимание БРС и ПБРС применительно к изготовлению валков холодной прокатки как цельнокованых [29], так и наплавленных композитных [27] (табл. 10). Благодаря вторичному твердению при температуре 500 °С в результате образования вторичного мартенсита и выделению сложных карбидов молибдена, ванадия и вольфрама эти материалы дают возможность сделать следующий шаг по повышению сопротивления валков холодной прокатки износу и катастрофическому разрушению при аварийных ситуациях на стане. Ожидается, что, кроме увеличения (почти в три раза) продолжительности кампании между сменой валков, эти материалы позволят обойтись без хромирования поверхности валков, которое применяется в настоящее время для сохранения ее шероховатости в процессе эксплуатации.

**Опорные валки.** Эти валки предназначены предохранять рабочие валки от изгиба и тем самым сохранять необходимую геометрию проката, а также обеспечивать безаварийную работу рабочих валков при высоких усилиях прокатки. При эксплуатации эти валки испытывают высокие сжимающие нагрузки, в результате которых в их приповерхностных слоях возникают циклические напряжения среза, иногда превышающие 500 МПа. Следовательно, если прочность материала валка будет недостаточна, в его приповерхностных слоях может протекать пластическая деформация. Известно, что переменные напряжения среза величиной 420 МПа в сочетании с деформационным упрочнением в конечном итоге вызывают усталость материала и выкрашивание валков [30]. Кроме этого, опорные валки подвергаются абразивному износу в результате попадания различных частиц, например

**Таблица 10. Типичный состав быстрорежущей и полубыстрорежущей стали поковок валков холодной прокатки**

Материал	Содержание, %				
	C	Cr	Mo	V	W
ПБРС	0,5...1,0	4,0...10,0	0,5...2,0	0,5...1,0	< 1,0
БРС	0,8...1,5	8,0...13,0	0,5...3,0	0,5...3,0	< 2,0

окалины, между опорными и рабочими валками. Следовательно, в идеале материал опорного валка должен обеспечивать высокое сопротивление возникновению и распространению усталостных трещин, малую способность к деформационному упрочнению и высокую износостойкость. Для опорных валков, используемых при горячей прокатке, материал должен также обеспечивать и высокую стойкость против разгарных трещин. Во всех случаях желательно иметь однородную микроструктуру и равномерные свойства валка по всей бочке.

Разнообразие материалов, используемых для изготовления опорных валков, существенно меньше, чем для рабочих валков холодной и особенно горячей прокатки. Наибольшее распространение за рубежом для этой цели нашли материалы, приведенные в табл. 11.

Опорные валки имеют обычно существенно больший диаметр, чем рабочие валки. Например, при диаметре рабочих валков чистовых клетей непрерывного листового стана горячей прокатки 650... 700 мм диаметр опорных валков составляет 1250... 1350 мм. Условия работы и размер опорных валков делают нерентабельным их изготовление целиком из высоколегированных сталей. Более целесообразно изготавливать их композитными. Поэтому опорные валки с рабочим слоем из высоколегированных сталей, в том числе и БРС, часто изготавливают путем наплавки [30].

Приведенный выше анализ показывает, что устойчивой тенденцией современного прокатного производства является использование

**Таблица 11. Наиболее употребляемые материалы для изготовления опорных валков [28, 30]**

Применение	Материал валка	Содержание, %								Твердость
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V	Co	
Горячая прокатка	Литая сталь	0,3...0,7	0,2...0,8	< 1,5	> 2,5	< 0,5	0,4...0,7	–	–	60...65 HSC
	Кованая сталь	0,3...0,5	0,5...0,9	0,3...0,8	> 2,5	< 1,0	0,4...0,6	–	–	60...65 HSC
	Наплавленный слой*	0,2...0,5	0,5...1,8	0,5...1,2	2,5...7,5	0,1...1,0	0,5...5,5	0,1...1,0	0,1...0,5	67...70 HSC
Холодная прокатка	Литая сталь	0,5	–	–	3,2	–	0,6	0,1	–	410...490 HV
	Кованая сталь	0,5	–	–	3,2	–	0,6	0,1	–	410...540 HV
	Чугун легированный	–	–	–	–	–	–	–	–	500...600 HV

\*Исследуемые составы.



композитных валков с рабочим слоем из высоколегированных материалов, причем эта тенденция прослеживается как для рабочих валков горячей и холодной прокатки, так и для опорных валков. Более того, по-видимому, в ближайшие годы практически весь парк традиционных прокатных валков, т. е. изготовленных в моноблочном исполнении из одного материала, будет заменен композитными валками с относительно дешевой осью, но с рабочим слоем из все более дорогих высоколегированных материалов. В связи с этим гибкость и дешевизна различных технологий производства композитных валков будут приобретать все большее значение. Поэтому перспективы электрошлаковой наплавки жидким металлом [26] представляются достаточно хорошими. При этом опять актуальной становится давняя проблема восстановительной наплавки бочки валков, т. е. не просто ремонта валков, а изготовления композитных валков из отработанных традиционных моноблочных валков как стальных, так и чугунных.

1. Schröder K. H. Questions, answers, more questions. Twenty five years experience in discussing rolls and rolling technology // 42nd Mechanical Working and Steel Processing Conf. Proceed. — Toronto, Ontario, Canada, October 22 – 25, 2000. — P. 697 – 708.
2. Carles P. Present and future hot strip mill finishing train work rolls // Rolls 2000+ «Advances in Mill Roll Technology» Conf. Papers — Birmingham, UK, April 12 – 14, 1999. — P. 49 – 59.
3. Indefinite chill: upgrading an old HSM work roll grade / B. Feistritzer, K. H. Schröder, M. Windhager, K. H. Ziehenberger // 41st Mechanical Working and Steel Processing Conf. Proceed. — Baltimore, M. D., USA, October 24 – 27, 1999. — P. 103 – 108.
4. Nylen T. Development of carbide reinforced rolls for hot rolling // Rolls 2000+ «Advances in Mill Roll Technology» Conf. Papers — Birmingham, UK, April 12 – 14, 1999. — P. 121 – 127.
5. Martiny F. Roufing work roll for hot strip mills // Ibid. — P. 269–280.
6. Prenni L. J., McGregor J. Technology enhanced work rolls for the roughing mill application // 42nd Mechanical Working and Steel Processing Conf. Proceed. — Toronto, Ontario, Canada, October 22 – 25, 2000. — P. 675 – 684.
7. Microstructure, mechanical properties and wear resistance of high speed rolls for hot rolling mills / M. A. de Carvalho, R. R. Xavier, C. S. P. Filho, et al. // Ibid. — P. 685 – 694.
8. Kane T. K. Section mill sleeves. Product development and improvements // Rolls 2000+ «Advances in Mill Roll Technology» Conf. Papers — Birmingham, UK, April 12 – 14, 1999. — P. 7 – 16.
9. Skoczynsky R. J., Walmag G., Breyer J. P. Improvement of the work roll performance on 2050 mm hot strip mill at ISCOR VANDERBIJLPARK // 42nd Mechanical Working and Steel Processing Conf. Proceed. — Toronto, Ontario, Canada, October 22 – 25, 2000. — P. 665 – 673.
10. Kudo T. HSS rolls: carbide morphology and properties // Rolls 2000+ «Advances in Mill Roll Technology» Conf. Papers — Birmingham, UK, April 12 – 14, 1999. — P. 71 – 80.
11. Ott G. A. The development of forged steel roll metallurgy for hot steel mill applications // 41st Mechanical Working and Steel Processing Conf. Proceed. — Baltimore, M. D., USA, October 24 – 27, 1999. — P. 321 – 334.
12. Ryu J. H., Park J. I. Thermal fatigue and wear properties of high speed steel roll for hot strip mill // Rolls 2000+ «Advances in Mill Roll Technology» Conf. Papers — Birmingham, UK, April 12 – 14, 1999. — P. 91 – 99.
13. Xin Z., Perks M. C. Production of HSS rolls for use in narrow hot strip mills and rod mills // Ibid. — P. 17 – 24.
14. New type of high speed steel rolls for hot strip mills / T. Yamaguchi, T. Hattori, H. Sorano, Y. Sano // Ibid. — P. 101 – 109.
15. Caithness L., Cox S., Emery S. Surface behaviour of HSS in hot strip mills // Ibid. — P. 111 – 120.
16. Development of high speed steel rolls at Villares / C. S. P. Filho, M. A. de Carvalho, C. Morone, A. Sinatora // 41st Mechanical Working and Steel Processing Conf. Proceed. — Baltimore, M. D., USA, October 24 – 27, 1999. — P. 335 – 339.
17. High speed steel work rolls at Dofasco's hot mill / E. J. Kerr, R. A. Hishon, W. J. Hill, R. J. Weber // Rolls 2000+ «Advances in Mill Roll Technology» Conf. Papers — Birmingham, UK, April 12 – 14, 1999. — P. 61 – 69.
18. Kerr E. J. High speed steel work rolls at Dofasco // 41st Mechanical Working and Steel Processing Conf. Proceed. — Baltimore, M. D., USA, October 24 – 27, 1999. — P. 117 – 121.
19. High performance HSS rolls with excellent surface deterioration resistance / K. Ichino, T. Koseki, T. Toyooka, H. Hiraoka // Ibid. — P. 109 – 115.
20. Webber R. J., Kerr E. J., Hill W. The use of high-speed steel rolls in the hot mill finishing stands at Dofasco // Rolls 2000, Programme and Conference Papers. — Birmingham, UK, March 28 – 29, 1996. — P. 67 – 76.
21. Collins D. HSS Rolls through 2000 // Ibid. — P. 90 – 100.
22. Adams T. P., Collins D. B. Properties of hot strip mill rolls and rolling // Proc. of 40th Mechanical working and steel processing conf. — Pittsburgh, Pennsylvania. — Oct. 25 – 28, 1998. — P. 427 – 431.
23. Hashimoto M., Shibao S. Recent technical trends of hot strip mill rolls at Nippon Steel Corporation // Rolls 2000, Programme and Conference Papers. — Birmingham, UK, March 28 – 29, 1996. — P. 76 – 89.
24. Delaitre L., Briot F., Milon O. High speed steel rolls: tracking methods for first stands, performance optimization and metallurgical evolution. // Ibid. — P. 101 – 107.
25. Beverley I., Robertson T., Woodland M. Developing the use of high speed steel work rolls in the hot strip mills of British Steel // Ibid. — P. 81 – 89.
26. Ukrainian ESS LM HSS rolls for hot strip mills / B. I. Medovar, L. B. Medovar, A. V. Chernets et al // 42nd Mechanical Working and Steel Processing Conf. Proceed. — Toronto, Ontario, Canada, October 22 – 25, 2000. — P. 647 – 653.
27. Application of the ESR technology to the manufacturing of bimetallic HSS rolls for cold and hot strip mills / C. Gaspard, S. Bataille, D. Battazzi, P. Thonus // Ibid. — P. 655 – 663.
28. McCann M. J. An overview of work rolls for cold rolling // Rolls 2000, Programme and Conference Papers. — Birmingham, UK, March 28 – 29, 1996. — P. 145 – 154.
29. Forged semi-HSS and HSS rolls designed for cold rolling reduction mills / C. Gaspard, S. Bataille, D. Battazzi et al // 41st Mechanical Working and Steel Processing Conf. Proceed. — Baltimore, M. D., USA, October 24 – 27, 1999. — P. 559 – 565.
30. Atamert S. Back-up rolls: new surface, new life // Ibid. — P. 547 – 557.

ЗАО «Элмет-Рол — группа Медовара», Киев

НИЦ ЭШТ ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 26.01.2001