

И. Ф. Кирчу, Т. В. Степанова, М. В. Супрун\*

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

\*ПАО «ММК им. Ильича», Мариуполь

## Перспективы применения стали с нитридванадиевым упрочнением для роликов слябовых МНЛЗ взамен стали 25Х1М1Ф

Приведены результаты натурных испытаний роликов диаметром 270, 300 и 370 мм из стали 25Х2Г1АФ. Установлено, что ролики из стали 25Х2Г1АФ по эксплуатационной долговечности превышают ролики из теплоустойчивой стали 25Х1М1Ф перлитного класса

**Ключевые слова:** теплоустойчивая азотосодержащая Fe-Cr-Mn-V сталь перлитного класса, ролики слябовой МНЛЗ

Одним из основных узлов МНЛЗ, обеспечивающих при эксплуатации ее надежность, высокую производительность, качество и себестоимость непрерывнолитой заготовки является роликовая проводка. При этом, если производительность МНЛЗ во многом зависит от межремонтного периода эксплуатации отдельных участков роликовой проводки, определяемого регламентными сроками работы роликов вторичного охлаждения, то качество и себестоимость непрерывнолитой заготовки – от состояния поверхности бочки ролика, затрат на их изготовление и последующий восстановительный ремонт.

В большинстве случаев продолжительность межремонтного периода эксплуатации роликовой проводки регламентируется износостойкостью, долговечностью роликов радиального и криволинейного участков, работающих в наиболее жестких условиях, включающих комплексное воздействие: высоких температур со стороны непрерывнолитой заготовки; циклических знакопеременных нагрузок, вызванных металлостатическим напором со стороны затвердевающей непрерывнолитой заготовки; термоциклического режима нагрева бочки ролика; высокотемпературного абразивного износа бочки ролика; на поверхность бочки ролика коррозионно-агрессивных солей хлоридов и сульфидов, а также химически активных легкоплавких окислов металлов, входящих как в состав окалины, образующейся на поверхности сляба и ролика, так и состав разливочной шлаковой смеси [1, 2].

Это приводит к разгару поверхности бочки ролика, образованию термоусталостных трещин, наматыванию окалины на ролик, а в дальнейшем ее отслаиванию и закатыванию в тело сляба [3].

Кроме того, в процессе эксплуатации ролики подвергаются восстановительному ремонту методом электродуговой наплавки более жаро- и износостойкими сплавами. Поэтому не менее важным фактором при выборе стали для роликов МНЛЗ является ее устойчивость к образованию холодных трещин и структур закалки в зоне сплавления и в сварочном шве.

Таким образом, стали и сплавы, применяемые как для изготовления роликов, так и последующего их

восстановительного ремонта должны комплексно сочетать в себе высокие прочностные свойства, теплоустойчивость, разгаро-, износо- и термостойкость, устойчивую долговечность при температурах до 600 °С и при этом быть технологичными при сварке.

В отечественной и зарубежной практике для изготовления цельнокованых роликов слябовых МНЛЗ широкое применение получили теплоустойчивые дисперсионно-упрочняемые карбидными фазами Cr-Mo-V-(Nb) стали перлитного класса, содержащие, %мас.: 0,9-1,2 молибдена, 0,25-0,50 ванадия, до 0,6 никеля, до 0,25 ниобия, а для их восстановления – низкоуглеродистые жаростойкие хромистые стали феррито-мартенситного и мартенситного классов.

Так, например, на Мариупольском металлургическом комбинате им. Ильича ролики слябовой МНЛЗ изготавливают из теплоустойчивой стали перлитного класса марки 25Х1М1Ф (ГОСТ 20072-74) состава, %мас.: 0,21-0,29 углерода, 0,25-0,50 кремния, 0,30-0,60 марганца, 1,50-1,80 хрома, 0,40 никеля, 0,90-1,05 молибдена, 0,22-0,39 ванадия, 0,025 серы, 0,025 фосфора,  $C_{\text{экв.}} = 0,834/1,079$ . Требуемые механические свойства роликов:  $\sigma_b = 685$  МПа,  $\sigma_T = 540$  МПа,  $\delta = 13$  %,  $\psi = 40$  %, КСЧ = 40 Дж/см<sup>2</sup>, НВ – 217-269. При восстановительном ремонте роликов сплошной промежуточный слой наплавляют проволокой из стали феррито-мартенситного класса марки CROMECORE 430-E состава, %мас.: 0,05 углерода, 0,90 марганца, 0,17 кремния, 17,5 хрома, а спиральный слой – проволокой из стали мартенситного класса марки CROMECORE 414E-0 состава, %мас.: 0,08 углерода, 1,00 марганца, 0,60 кремния, 13,5 хрома, 4,30 никеля, 0,50 молибдена, 0,10 азота.

Опыт эксплуатации цельнокованых роликов из стали 25Х1М1Ф показал, что при существующем уровне их стойкости в течение года требуется 3-4 замены радиального и криволинейного участков роликовой проводки [1]. При этом реализуемый суммарный уровень наработки, включающий и наработку после восстановительного ремонта, составляет для роликов радиального участка диаметром 270 и 300 мм – 448 тыс. т отлитой стали, криволинейного и

прямолинейного участков диаметром 370 мм – 914 и 1500 тыс. т отлитой стали соответственно [3].

Необходимо отметить, что согласно стандарту предприятия суммарная наработка роликов радиального участка диаметром 270 и 300 мм должна составлять 3200 плавков (448 тыс. т отлитой стали), криволинейного диаметром 370 мм – 7000-8000 плавков (980-1120 тыс. т), прямолинейного диаметром 370 мм – 18000 плавков (2500 тыс. т). Кроме того, ролики радиального участка допускается восстанавливать методом наплавки не более одного раза, диаметром 370 мм – не более двух раз. При этом ролики криволинейного участка после второй наплавки должны устанавливаться только на горизонтальном участке.

Как видно, по продолжительности работы только ролики радиального участка соответствуют требованиям технических условий. Продолжительность же работы роликов криволинейного и прямолинейного участков на 18,4 и 40 % меньше соответственно.

Анализ литературных данных [1, 3, 5] и результатов исследований характера износа роликов показал, что до 75 % новых роликов выводится из эксплуатации из-за высокотемпературного износа рабочей поверхности бочки, после чего их подвергают восстановлению и до 25 % роликов – по трещинам разгара и кольцевым трещинам. Ролики же, подвергнутые восстановлению, как правило, отбраковываются по кольцевым трещинам.

Металлографические исследования отбракованных роликов, а также послойный химический анализ состава окалины, снятой с поверхности бочки ролика показали, что основными причинами образования сетки разгара, кольцевых трещин и трещин разгара являются химическая и структурная неоднородности стали, анизотропия механических свойств по длине бочки ролика, недостаточная тепло- и жаростойкость стали и наплавочных сплавов в среде окалины, содержащей легкоплавкие химически активные окислы –  $MoO_3$ ,  $V_2O_5$  и коррозионно-агрессивные соли хлоридов и сульфидов, их склонность к охрупчиванию при температурах эксплуатации.

Так разность значений твердости поверхности бочки роликов диаметром 270, 300 и 370 мм между левым и правым концами может изменяться от 37 до 75 НВ в то время, как техническими условиями допускается не более 52 (рис. 1), а содержание молибдена и ванадия в слое окалины, прилегающей к поверхности ролика в 2,16 и в 1,37 раз выше соответственно, чем в слое, контактирующем с поверхностью сляба (табл. 1). Причиной такого разброса значений твердости является наличие градиента температур в рабочем пространстве печи отпуска, который может колебаться в пределах от 30 до 50 °С, а также недостаточная термодинамическая устойчивость упрочняющих карбидных фаз –  $Mo_2C$  и  $VC$ .

Необходимо отметить, что нагрев под закалку и последующий отпуск проводится в печах с вертикальным расположением роликов.

Таким образом, повышение надежности, долговечности в эксплу-

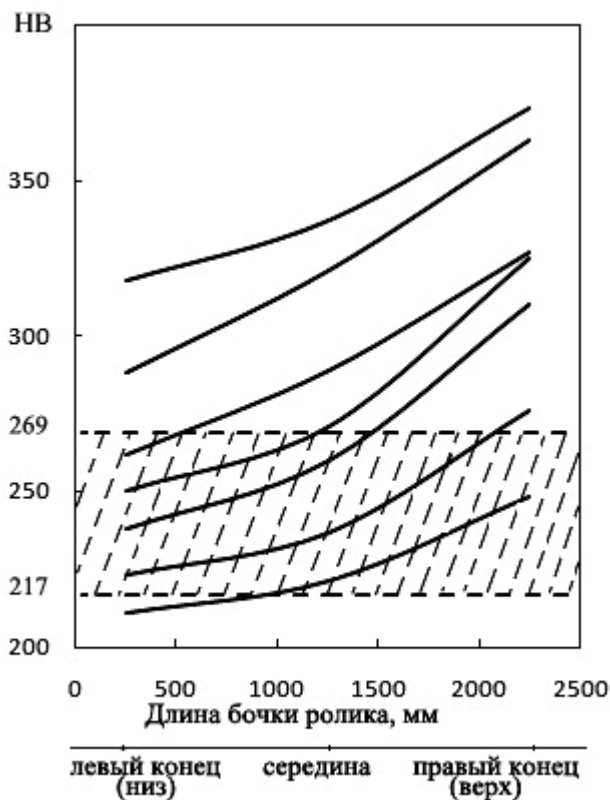


Рис. 1. Изменение твердости поверхности бочки роликов из стали 25X1M1Ф после улучшения. Заштрихованная область – допускаемый ТУ интервал твердости по длине бочки ролика

атации роликов МНЛЗ неразрывно связано со снижением химической, структурной неоднородности повышением их термостойкости, теплостойкости, жаростойкости и износостойкости стали при температурах эксплуатации.

Эта задача может быть решена применением технологии карбонитридного упрочнения стали, основанной на легировании азотом в комплексе с экономным легированием активными нитридообразующими элементами (ванадием, церием, алюминием).

Данная технология позволяет решать в комплексе вопросы наиболее экономного расхода дефицитных легирующих элементов, повышения прочностных и пластических свойств, теплостойкости, жаростойкости, усталостной прочности.

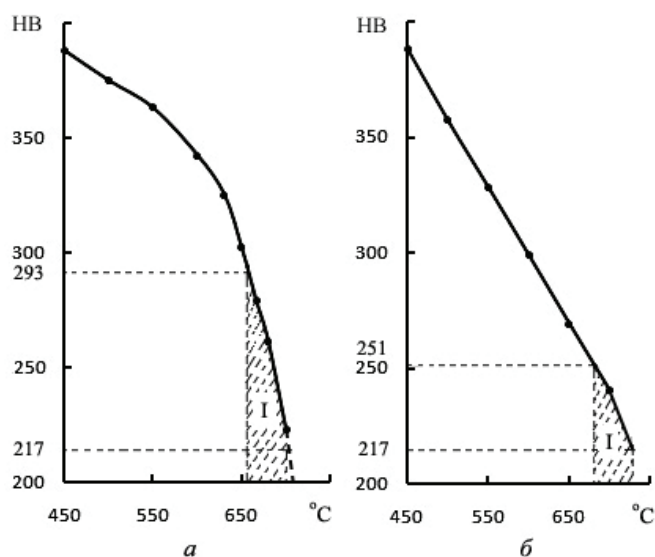
Так в работе [2] авторами показано, что сталь перлитного класса марки 25X2Г1АФ превосходит стандартную теплоустойчивую сталь 25X1M1Ф по прокаливаемости 2,8 раза, теплоустойчивости при температуре выдержки 550 °С в 3,3 раза, жаростойкости при 650 °С на 42,7 %. Кроме того, при отпуске в интервале температур 600-700 °С скорость разупрочнения стали

Таблица 1

Химический состав окалины

Место определения	Массовая доля элементов, %										
	Si	Mn	Cr	S	K	Na	Al	V	Mo	Cl	Fe
Со стороны поверхности:											
- сляба	2,39	1,02	0,09	3,8	0,59	1,39	0,57	0,08	1,2	0,77	88,1
- ролика	1,92	1,47	0,09	0,2	0,18	0,23	0,37	0,11	2,6	0,14	92,78

25X2Г1АФ в 1,9 раза меньше, чем у стали 25X1М1Ф (рис. 2). Этот факт важен, так как позволяет прогнозировать снижение анизотропии механических свойств по длине бочки ролика, повышение процента роликов, соответствующих требованиям ТУ даже при наличии градиента температуры в печи отпуски в 50 °С.



**Рис. 2.** Зависимость твердости стали от температуры отпуска: а – сталь марки 25X1М1Ф ( $C_{\text{экв.}} = 0,900$ ), закалка в масле от 930 °С; б – сталь марки 25X2Г1АФ ( $C_{\text{экв.}} = 0,870$ ), закалка в масле от 940 °С; I – область изменения температурного поля в печи при отпуске стали на HV 217. Горизонтальные пунктирные линии – пределы изменения твердости стали при градиенте температуры в печи 50 °С

Следует отметить, что по свариваемости сталь марки 25X2Г1АФ не уступает стали 25X1М1Ф.

*Цель исследований* – разработка рекомендаций по повышению надежности и долговечности роликов МНЛЗ из стали 25X2Г1АФ.

Поставленную задачу решали методом комплексной оптимизации химического состава стали, режимов термической обработки роликов (температур закалки и последующего отпуска), а также механических свойств (твердости). Сталь 25X2Г1АФ выплавляли в 25-тонной электродуговой печи. Химический состав плавов приведен в табл. 2. Плавки разливали сифонным способом в 5-ти тонные слитки. Слитки плавов № 1-3 ковали на заготовки под 13 роликов диаметром 370 мм, плавов 4-6 – на заготовки под девять роликов диаметром 270 мм, два – диаметром 300 мм, шесть – диаметром 370 мм. Закаливали ролики в масле от 940 °С. Температуру отпуска выбирали из расчета получения значений нижнего предела твердо-

сти бочки ролика в интервале HV 215-240. Градиент температуры по высоте рабочего пространства при отпуске роликов плавов № 1 и 2 составил 50 °С, плавов № 3-6 – 30 °С. Влияние градиента температуры на изотропность механических свойств определяли по изменению твердости поверхности по длине бочки ролика. Испытания роликов диаметром 270 и 300 мм проводили на радиальном участке роликоточильной проводки, диаметром 370 мм – на криволинейном участке. После второй наплавки ролики диаметром 370 мм продолжали эксплуатировать на прямолинейном участке роликоточильной проводки.

Восстанавливали ролики наплавкой согласно заводской технологии так же, как и ролики из стали 25X1М1Ф. Результаты измерения твердости поверхности бочки роликов после термической обработки, их стойкость при эксплуатации приведены в табл. 3-4.

Ранее отмечалось, что применение стали 25X2Г1АФ может обеспечить уменьшение анизотропии механических свойств по длине бочки ролика и увеличение числа роликов, соответствующих ТУ даже при градиенте температуры 50 °С в печи при отпуске.

Разность значений твердости поверхности бочки ролика между левым и правым концами (см. табл. 3 и 4) при градиенте температуры в печи отпуски 50 °С составила HV 34 (плавки № 1 и 2), 30 °С – HV 12-14 (плавки № 3-6), что намного меньше разности твердости HV 52, допускаемой ТУ. Кроме того повышенная теплоустойчивость и более низкая скорость разупрочнения стали 25X2Г1АФ, чем стали 25X1М1Ф позволяет повысить нижний предел твердости с HV 217 при градиенте температуры в печи 50 °С до HV 235, а при градиенте 30 °С – до HV 250 при 100 % выходе годных роликов (рис. 3). При этом механические

Таблица 2

#### Химический состав стали

Номер плавки	Массовая доля элементов, %								$C_{\text{экв}}$
	C	Si	Mn	Cr	S	P	N	V	
1	0,31	0,24	1,11	1,91	0,010	0,013	0,016	0,11	0,901
2	0,28	0,24	0,81	1,93	0,016	0,037	0,011	0,12	0,838
3	0,27	0,17	1,08	2,24	0,015	0,017	0,0124	0,12	0,922
4	0,27	0,34	1,21	1,55	0,016	0,017	0,014	0,11	0,812
5	0,29	0,33	1,06	1,63	0,02	0,025	0,011	0,12	0,826
6	0,25	0,33	1,06	1,63	0,02	0,021	0,012	0,13	0,786

Таблица 3

#### Результаты натуральных испытаний роликов диаметром 270 и 300 мм из стали 25X2Г1АФ плавов № 4 и 5

D, мм	Ролик		Количество плавов, шт.	Отлито стали, т	Повышение стойкости, %
	номер	HV*			
270	3-654	240/252	3724	521360	16,4
	3-656	240/252	3637	509180	13,6
	3-657	—	4277	598780	33,6
	3-658	—	3790	530600	18,4
	3-659	—	3570	499800	11,5
	3-660	—	3949	552860	23,4
300	4-723	—	3441	481740	7,5
	4-737	—	3960	554400	23,7

\* Твердость левого/правого концов ролика

свойства левого/правого концов бочки ролика составят при градиенте температур 50 °С НВ 235/269,  $\sigma_b = 940/1020$  МПа,  $\sigma_T = 750/870$  МПа,  $\delta = 19/16$  %,  $\psi = 65/58$  %, КСУ = 85/68 Дж/см<sup>2</sup>; при 30 °С –

НВ 250/ 269,  $\sigma_b = 950/1020$  МПа,  $\sigma_T = 780/870$  МПа,  $\delta = 18/16$  %,  $\psi = 65/58$  %, КСУ = 76/68.

Анализ стойкости роликов из стали марки 25Х2Г1АФ показал, что на радиальном участке ро-

### Результаты испытаний (на криво- и прямолинейном участках) роликов диаметром 370 мм из стали марки 25Х2Г1АФ плавков № 1-3 и 6

Номер плавки	Ролик	НВ*	Количество плавков, шт	Отливо стали, т
1	5-706	215/249	9611+0=9611	1345540
	5-712	215/249	7781+0=7781	1089340
	5-713	-	9545+0=9545	1336300
	5-714	218/252	7666+0=7666	1073240
2	5-782	220/254	5649+10826=16478	2306920
	5-787	220/254	8092+8899=16991	2378740
3	5-963	226/240	7709+10000=17709	2479260
	5-966	221/234	10860+6945=17805	2492700
6	5-1162	240/252	10108+7652=17760	2486400

\* – см. табл. 3

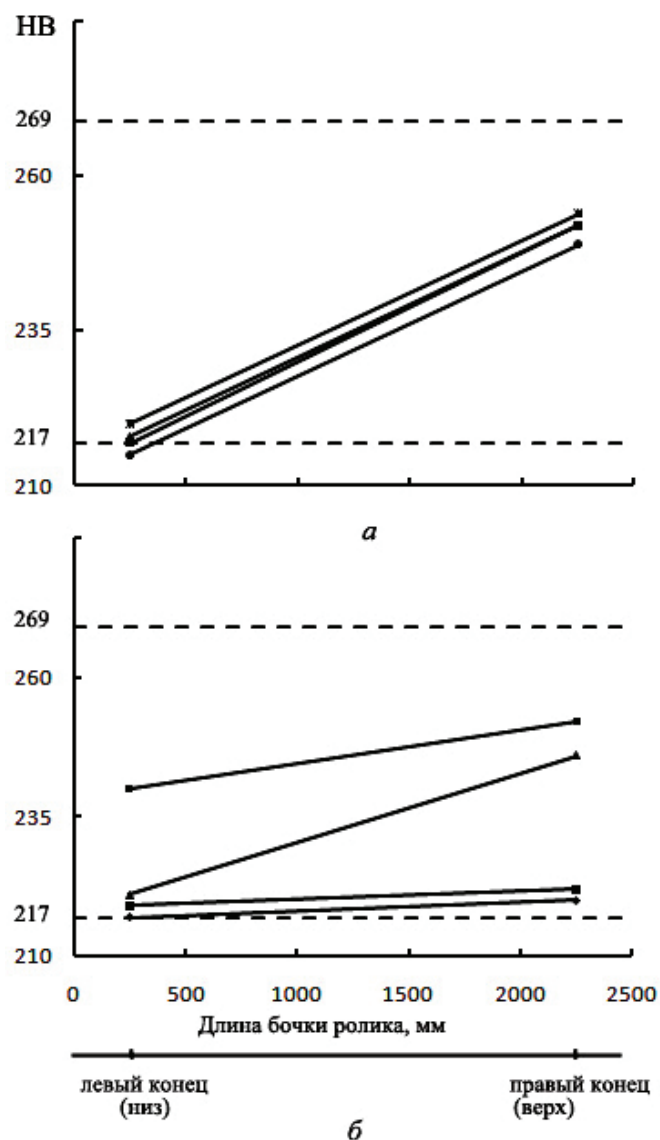


Рис. 3. Изменение твердости поверхности бочки роликов из стали 25Х2Г1АФ при градиенте температуры в печи 50 °С (а); 30 °С (б). Горизонтальные пунктирные линии – допустимая ТУ разность значений твердости по длине бочки ролика

Таблица 4 ликовой проводки продолжительность их работы превышает регламентный срок наработки – 3200 плавков, и ее можно повысить на 25-30 %. Это позволит дополнительно разливать на 134,4 тыс. т стали больше (табл. 3). На криволинейном участке – больше на 10-55 % минимально допустимый срок наработки – 7000 плавков (табл. 4). Причем более 57 % роликов по долговечности превышают максимально допустимый срок наработки – 8000 плавков. Отметим, что ролики плавки № 1 отработали регламентный срок только на криволинейном участке и были отбракованы по трещинам разгара, а

ролики плавков № 2, 3, 5 и 6 после второй наплавки дополнительно эксплуатировались на прямолинейном участке роликовой проводки. Суммарная стойкость этих роликов составила 16478 плавков и более, то есть от 2,31 до 2,49 млн т отливой стали, что в среднем на 60 % больше, чем для роликов из стали марки 25Х1М1Ф. При этом ролики плавков № 2-6 были выведены из эксплуатации вследствие высокотемпературного износа бочки.

Исследование причин более низкой стойкости роликов диаметром 370 мм плавки № 1, чем роликов плавков № 2, 3, 5 и 6 показало, что основным фактором, определяющим долговечность восстановленных наплавкой роликов, является не величина  $S_{экв}$  стали, а содержание углерода. Так, например, у стали плавки № 3, ролики из которой выдержали более 16478 плавков,  $S_{экв} = 0,922$ , а у стали плавки № 1, ролики из которой выдержали от 7666 до 9611 плавков,  $S_{экв} = 0,901$ . Однако при этом содержание углерода в стали плавки № 3 меньше — 0,27 %, чем в стали плавки № 1 — 0,31 % (см. табл. 2).

Известно, что конструкционные низколегированные стали с  $S_{экв} > 0,45$  относятся к разряду трудносвариваемых из-за их склонности к образованию в околошовной зоне и зоне термического влияния сварки закалочных структур и холодных трещин. Причем склонность стали к образованию в околошовной зоне холодных трещин и структур закалки в большей мере зависит от содержания углерода, чем от содержания марганца и хрома, то есть сопротивляемость стали образованию холодных трещин в шве резко снижается с увеличением содержания углерода [6]. Кроме того, применение для наплавки промежуточного слоя проволоки феррито-мартенситного класса снижает сопротивляемость образованию холодных трещин в зоне сплавления.

Таким образом, причиной образования трещин разгара у роликов плавки № 1 является комплексное влияние повышенного содержания углерода в стали и применение для наплавки промежуточного слоя хромистой феррито-мартенситной стали.

Из вышеизложенного следует, что для гарантированного повышения сопротивляемости образованию холодных трещин в околошовной зоне верхний предел марочного содержания углерода в стали не должен превышать 0,28 %.

Испытания новых роликов на прямолинейном участке роликовой проводки не проводили. Однако максимальная суммарная наработка роликов на криволинейном и последующая их эксплуатация на горизонтальных участках меньше регламентируемой для горизонтального участка. При этом, как отмечалось, ролики были выведены из эксплуатации из-за высокотемпературного износа бочки, что указывает на недостаточную жаростойкость и теплоустойчивость применяемых наплавочных сплавов. Это позволяет прогнозировать, что установленный для горизонтального участка регламентный срок эксплуатации роликов 18000 плавов не будет достигнут. Поэтому необходимым условием достижения регламентного срока является применение для наплавки промежуточного и спирального слоев более жаростойких и теплостойких сплавов, устойчивых к тепловому охрупчиванию.

## Выводы

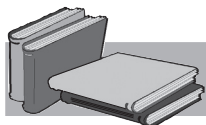
Результатами испытаний опытно-промышленной партии роликов из стали 25X2Г1АФ установлено:

– микролегирование азотом и ванадием более эффективно, чем Mo + V, повышает химическую и структурную однородность стали в разных сечениях ролика;

– дисперсионно выделившаяся в объеме зерна нитридванадиевая фаза в интервале 600-725 °С термодинамически стабильнее, чем карбидные фазы молибдена и ванадия, и эффективнее снижает чувствительность стали к изменению температурного поля в печи при отпуске;

– максимально допустимое марочное содержание углерода, обеспечивающее при электродуговой наплавке отсутствие в околошовной зоне холодных трещин и структур закалки, не должно превышать 0,28 %;

– применение разработанной стали 25X2Г1АФ состава, %мас.: углерода – 0,20-0,28, кремния – 0,17-0,37, марганца – 1,10-1,30, хрома – 1,55-2,20, серы – ≤ 0,025, фосфора – ≤ 0,025, азота – 0,012-0,016, ванадия – 0,09-0,14 позволяет повысить суммарную стойкость роликов радиального участка на 25-30 %, криволинейного – на 50, горизонтального – 30; снизить в 3,5 раза себестоимость роликов за счет устранения легирования молибденом, никелем и снижения вдвое – содержания ванадия.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Опыт применения роликов, бандажированных центробежным биметаллом на слябовой МНЛЗ металлургического комбината им. Ильича / Ларионов А. А., Сабанский Н. В., Шибаниц Э. Н. и др. // Металл и литье Украины. – 1997. – № 2-4. – С. 31 – 32.
2. Кирчу И. Ф., Степанова Т. В., Супрун М. В. Теплоустойчивая Fe-Cr-Mn сталь перлитного класса с нитридванадиевым упрочнением для роликов слябовой МНЛЗ // Сталь. – 2014. – № 3. – С. 83-87.
3. Бочек А. П., Климачук В. В., Фентисов П. Н. Усовершенствование оборудования МНЛЗ // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 10. – С. 74-76.
4. Карлинский С. Е., Денисов Ю. В. Совершенствование процессов непрерывной разливки стали. // Киев: Сборник трудов. – 1985. – С. 63-66.
5. Бочек А. П., Климачук В. В., Кирильченко П. Н. Состояние и основные пути развития непрерывной разливки стали на металлургических предприятиях Украины. // Харьков: Труды научно-технической конференции 26-27 июня 2001 г. – С. 67-70.
6. Макаров Э. Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 234 с.

## Анотація

*Кірчу І. Ф., Степанова Т. В., Супрун М. В.*

Перспективи використання сталі з нітридванадієвим зміцненням для роликів слябових МБЛЗ замість сталі 25X1М1Ф

Наведено результати натурних випробувань роликів діаметром 270, 300 та 370 мм із сталі марки 25X2Г1АФ. Встановлено, що ролики із сталі 25X2Г1АФ за експлуатаційною довговічністю перевищують ролики із теплостійкої сталі 25X1М1Ф перлітного класу.

## Ключові слова

теплостійка із вмістом азоту Fe-Cr-Mn-V сталь перлітного класу, ролики слябової МБЛЗ

The results of field tests diameter rollers 270, 300 and 370 mm of 25X2Г1АΦ steel. It was found that the rollers of steel 25X2Г1АΦ on useful life exceeds the rollers of heat-resistant pearlitic 25X1M1Φ steel

**Оформление рукописи для опубликования  
в журнале "Металл и литьё Украины":**

*Материалы для публикации необходимо подавать в формате, поддерживаемом Microsoft Word, размер страницы А4, книжная ориентация, шрифт – Arial, 10, междустрочный интервал – 1,5. Объём статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.*

**Рукопись должна содержать:**

- УДК;
- фамилии и инициалы всех авторов (на русском, украинском и английском языках);
- название статьи (на русском, украинском и английском языках);
- название учреждения(й), в котором(ых) работает(ют) автор(ы);
- аннотации (на русском, украинском и английском языках);
- ключевые слова (не менее шести) – на русском, украинском и английском языках;
- предлагаемая структура текста (Arial 10, прямой) научной статьи: «Введение», «Материалы и методы», «Результаты и обсуждение», «Выводы».
- таблицы должны иметь порядковый номер (Arial 10, курсив) и заголовок (Arial 10, п/ж), текст в таблице (Arial 9, прямой), примечания к таблицам размещаются непосредственно под таблицей (Arial 8, курсивом).
- формулы (Arial 11, русские символы – прямым, английские – курсивом, греческие – Symbol 12, прямым) должны иметь порядковый номер (Arial 10, прямой);
- рисунки, схемы, диаграммы и другие графические материалы должны быть чёрно-белыми, чёткими, контрастными, обязательно иметь номер и подрисуночную подпись (Arial 9, прямой); все громоздкие надписи на рисунке следует заменять цифровыми или буквенными обозначениями, объяснение которых необходимо выносить в подрисуночную подпись;
- список литературы (Arial 9);
- ссылки нумеруются в порядке их упоминания в тексте, где они обозначаются порядковой цифрой в квадратных скобках (например - [1]).