

УДК 621.771.001

Николаев В. А.
Васильев А. Г.
Васильев А. А.

ОСОБЕННОСТИ ПРОКАТКИ НА СТАНАХ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ С РАЗДЕЛЕНИЕМ ЧИСТОВОЙ ГРУППЫ КЛЕТЕЙ

Длительное время непрерывные (полунепрерывные) широкополосные станы горячей прокатки (ШСГП) не имели конкуренции в производстве тонких полос, хотя их технологические процессы имели серьезные недостатки [1, 2]:

– большой расход металла при прокатке на обжимных станах (слябингах) вследствие использования слитков с усадочной раковинной и прибыльной надставкой;

– дополнительный расход топлива на нагрев (подогрев) слябов в печах и потери тепла при транспортировке слябов (промежуточного раската) по транзитному и промежуточному рольгангам и при этом большие потери металла в окалину;

– большие потери температуры по длине полосы в процессе прокатки и, вследствие этого, возникающие сложности получения тонких полос (менее 2,0 мм) и существенная продольная разнотолщинность (рис. 1) и др.

В значительной степени указанные недостатки технологического процесса ШСГП первого поколения удалось ликвидировать путем применения толстослябовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), совмещенных с ШСГП, применения непрерывной прокатки в черновой группе клетей, применения теплосохраниющих экранов на промежуточных рольгангах и промежуточных перемоточных устройств (ППУ-Coilbox), ускорения валков клетей чистовой группы после захвата переднего конца полосы моталкой, бесконечной прокатки полос в чистовой группе ШСГП пятого поколения [2], а затем и литейно-прокатных модулей (ЛПМ) [1–5], на которых обеспечивалась горячая прокатка полос толщиной 1,5 мм и менее из тонких слябов ($H = 50 \dots 70$ мм).

Однако по целому ряду причин действующие ШСГП со слитковой технологией продолжают работать [2], но эта технология не обеспечивает получение листов (полос) с высоким качеством поперечного и продольного профилей (рис. 1) и рациональных механических свойств.

Целью данной работы является совершенствование технологического процесса горячей прокатки на широкополосном стане первого-третьего поколений, обеспечивающего получение конкурентно-способных горячекатаных качественных тонких полос.

Так, в работе [7] предлагается на действующих ШСГП, параллельно с существующей чистовой группой клетей, устанавливать дополнительно вторую шестиклетевую чистовую группу клетей с меньшей длиной бочки валков для прокатки тонких полос ($h \leq 1,0$ мм) шириной $B = 900 \dots 1300$ мм (на ШСГП 2000). Однако в указанном варианте не решается задача уменьшения (устранения) утолщений задних концов полос, прокатываемых без воздействия на них заднего натяжения.

Исследования показывают, что при существующей технологии (без ППУ) толщина полосы существенно изменяется по ее длине. Минимальная толщина полосы соответствует участку 2 (рис. 1) на переднем конце, где имеют место достаточно высокая температура и на полосу действует и переднее и заднее натяжение. На участке 1 отсутствует переднее натяжение и толщина полосы несколько больше. На участке 2–3 увеличение толщины обусловлено снижением температуры полосы, увеличением силы прокатки и, следовательно, упругих деформаций клетки и межвалкового зазора. Максимальное значение толщины на участке 4 заднего конца полосы, где минимальная температура и отсутствует заднее натяжение. Приращение толщины полосы на участке 4 составляет $\delta h_{II} \approx 0,2$ мм и более. При использовании ППУ, на толщину заднего конца полосы влияет в основном отсутствие заднего натяжения и приращение толщины на заднем участке 4 оказывается меньше и составляет $\delta h_{II} \approx 0,07 \dots 0,15$ мм.

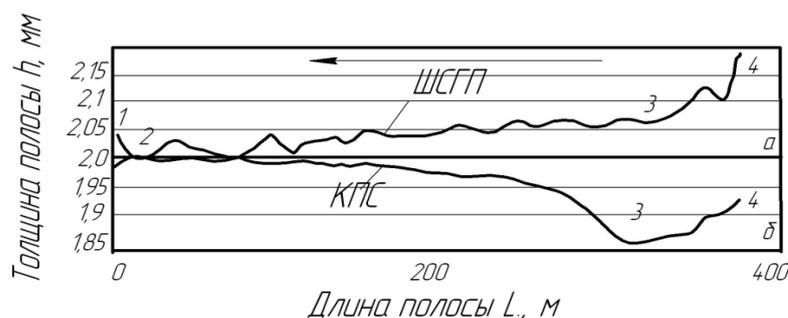


Рис. 1. Профилограммы изменения толщины по длине полосы (сталь 08пс) при прокатке на ШСГП без койлбокса (а) (данные МК «Запорожсталь») и при прокатке на КПС (б)

Снижение утолщений концевых участков и продольной разнотолщинности по длине полосы может быть осуществлено путем использования нового технического решения – разделения чистовой группы из 6–7 клетей на две самостоятельные подгруппы клетей (по 2–4 клетки в каждой подгруппе) с промежуточным перемоточным устройством (ППУ-Coilbox) (рис. 2) [Комбинированный полосовой стан (КПС)] [8].

Как следует из рис. 2, чистовая группа ШСГП разделена на две подгруппы по 3 клетки. После первой подгруппы 4 установлено ППУ-5 и дополнительно ножницы 8 и окалиноломатель 9, а затем самостоятельно работающая вторая подгруппа клетей 10. Промежуточный раскат после черновой группы клетей (А) сматывают в ППУ (Б; В) и подают (после ножниц 2 и окалиноломателя 3) в первую подгруппу 4 чистовой группы клетей (клетки «а–в»). Выходящая из клетки «в» полоса сматывается в ППУ-5 со скоростью $v_{II} = 5 \dots 12$ м/с, а после окончания смотки полоса из рулона 6 направляется во вторую подгруппу клетей 10 (клетки «г–е»), в которой полосу прокатывают со скоростью 10...25 м/с. Деформационно-скоростной режим прокатки полосы рассчитывают таким образом, чтобы время прокатки во второй подгруппе клетей 10 было несколько меньше, чем в первой подгруппе клетей 4, а силовые параметры обеспечивали необходимую точность поперечного профиля полос. Регулирование температурного режима выполняется при помощи подачи воды на рулон и полосу из коллекторов 12 или подогрева в проходной индукционной печи 14. Полосы толщиной $h > 2$ мм транспортируются к моталкам по отводящему рольгангу с душирующей установкой. Полосы толщиной $h < 2$ мм сматываются моталками 13, расположенными непосредственно за клетью 10 «е», а затем рулоны передают на параллельный отводящий рольганг с разматывателем, душирующим устройством, двумя моталками и необходимым оборудованием (на рис. не показано).

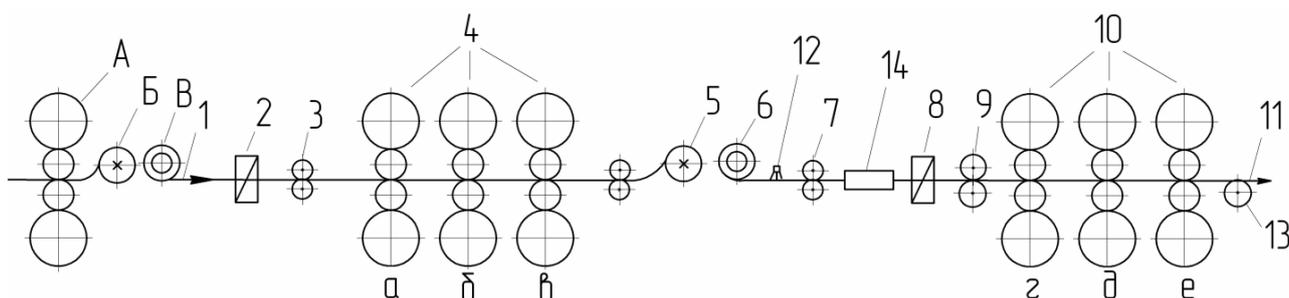


Рис. 2. Фрагмент ШСГП с разделенной чистовой группой клетей:

1 – промежуточный раскат; 2, 8 – ножницы; 3, 9 – чистовые окалиноломатели; 4 – первая подгруппа клетей чистовой группы; 5 – ППУ; 6 – рулон; 7 – тянущие ролики; 10 – вторая подгруппа клетей чистовой группы; 11 – готовая полоса; 12 – коллекторы охлаждения; 13 – моталка для полос $h < 2$ мм; 14 – подогревательная индукционная печь; а–е – клетки; А – последняя клеть черновой группы; Б – ППУ; В – рулон с промежуточным раскатом

К достоинствам рассмотренного КПС (комбинированного полосового стана) с разделенными подгруппами клетей чистовой группы можно отнести следующее.

1. Возможность применения в каждой подгруппе собственного деформационно-скоростного режима, не связанного постоянством секундного объема металла в клетях «а–в» и «г–е». Например, увеличивать или уменьшать величину суммарного обжатия и температуры полосы независимо в каждой подгруппе, и тем самым, влиять на структуру и механические свойства готовой полосы.

2. При наличии ППУ-5 оказывается возможным увеличить скорость прокатки в первой клети чистовой группы до 3...5 м/с, что обеспечит повышение производительности непрерывного стана.

3. При наличии ППУ-5 во время и после смотки полосы в рулон 6 обеспечивается промежуточная рекристаллизация металла, выравнивание размеров зерен структуры, снижение величин напряжения течения за счет разупрочнения и энергосиловых параметров; снижается уровень внутренних дополнительных напряжений.

4. Температурные условия прокатки заднего конца полосы рулона 6 (бывшего передним в клетях 4), а также снижение силовых условий прокатки в клетях 10 («г–е»), обеспечивают возможность прокатки на КПС полос толщиной $h < 1,5$ мм.

5. Смена положения концевых участков после клетей 4, (задний конец становится передним в рулоне 6) обеспечивает повышение точности продольного профиля полосы за счет смены направления температурного клина по длине полосы (с прямого на обратный относительно направления прокатки), а также более высокой температурой заднего конца полосы по сравнению с передним концом (бывшем задним концом в клети 4, «в»). Технология прокатки со сменой положения концевых участков компенсирует отсутствие натяжения концов полосы и уменьшает их утолщения.

Оценку технологии комплекса КПС выполнили с использованием известных моделей расчета температуры полосы во время прокатки [9–12], силы горячей прокатки полос [13–16] и приращения толщины по длине полосы [17–20]. Расчет приращения толщины по длине полосы относительно минимальной толщины на участке 2 (рис. 1) выполнили по итерационной модели [17, 20]:

$$\delta h_{Pi} = \frac{P_i - P_2}{M_{кл} + \delta M_{Pi}}; \quad \delta M_{Pi} = M_{Pi} + M_{Pi2}; \quad (1)$$

$$M_{Pi} = \frac{\varphi_i P_i}{\Delta h_i}; \quad \varphi_i = (0,57 + 0,62 \varepsilon_i) \left[1 + 0,023 \left(\frac{R_i}{H_i} \right)^{0,5} \right], \quad (2)$$

где P_i и P_2 – сила прокатки на i -ом участке и на участке 2; M_{ni} и M_{n2} – модули жесткости полосы на i -ом участке и на участке 2; R_i – радиус вала; H_i – исходная толщина полосы перед клетью; ε_i – относительное обжатие; Δh_i – абсолютное обжатие; φ_i – коэффициент, определенный из работы [18].

Расчет по формулам (1) и (2) выполняли методом итераций. В первой итерации рассчитывают величину δh_i по данным первого расчета P_i , P_2 , M_n . Затем определяют h_i'' и $\Delta h_i''$ и остальные параметры, в т. ч. и P_i'' , по которым рассчитывают значения $\delta h_i''$ во второй итерации. Расчеты δh_{Pi} по выражению (1) выполняют до тех пор, пока разница между соседними значениями δh_{Pi} составит $\Delta = \pm 0,003$. При $\Delta = 0$ расчетная система геометрический очаг деформации – сила прокатки приходит в равновесие, а при $\Delta = \pm 0,003$ система близка к равновесию.

При расчете приращений толщины использовали режим деформации в клетях чистовой группы ШСП 1680 (шесть клетей) из работы [21]. Температуру переднего конца промежуточного раската (точка 1) принимали равной 970 °С, длину участков на переднем и заднем концах прокатываемых без соответствующих натяжений на промежуточном раскате принимали равными 2,8 м (расстояние между точками 1–2 и 3–4). Градиент температур по

длине промежуточного раската (между т.т. 2 и 4) равен 65 °С. Суммарное расстояние между клетями № 7в и № 8г приняли равным 12 м (рис. 2), а потери температуры на ППУ-5 приняли равными 7 °С.

Результаты расчетов представлены в табл. 1 и 2. Как следует из табл. 1 и 2, расчетные силы P_2 и крутящий момент M_2 на участке 2 достаточно близки к опытным значениям (кроме клетки № 5), особенно в клетях № 8–10. Расчеты выполнены с учетом полного разупрочнения металла в клетях стана. Температура раската по клетям чистовой группы ШСПП монотонно снижается на переднем конце до $t = 805,2$ °С (в клетки № 10). Градиент температур по длине готовой полосы составляет $\Delta t = 12,0$ °С (табл. 1). После смотки раската в ППУ и кантовки его на 180 град (когда задний конец становится передним) температура заднего конца раската оказывается выше, чем переднего (кривые 4,5) и градиент температур по длине готовой полосы равен $\Delta t = -6,7$ °С (прокатка в клетях № 8г, 9д и 10е). Поскольку в клетки № 8г–10е входит утолщенный конец (задний в клетки № 7в) (табл. 2), то в клетях № 8д–10е выполнена перестройка межвалковых зазоров для получения толщины полосы равной $h = 2,0$ мм в клетки № 10е (участок 2е – базовая толщина, относительно которой затем рассчитываем приращение толщины полосы на заднем конце на новом участке 4е).

Таблица 1

Параметры прокатки в чистовых клетях ШСПП 1680 полос стали 08пс с размерами сечения $2,0 \times 1030$ мм. Толщина подката 26,9 мм, $\Delta t_5 = 65$ °С.

№ клетки	h , мм	ε	l_c , мм	v , м/с	f	t_H , °С	t_K , °С	P_{cp} , Н/мм ²	P , МН	N , кВт/ч	δh_{II} , мм
Участок 2 по рис. 1, $\delta h_{II} = 0$ мм											
5	12,91	0,520	65,73	1,44	0,389	963	970,5	258,9	17,5	5527	0
6	8,02	0,379	39,24	2,32	0,336	955,2	938,3	261,8	10,6	3083	0
7	5,17	0,355	30,36	3,60	0,298	923,8	907,3	319,3	10,0	3308	0
8	3,41	0,340	24,33	5,45	0,253	894,3	879,4	384,6	9,6	3632	0
9	2,44	0,284	18,50	7,63	0,215	867,5	844,2	406,9	7,7	2935	0
10	2	0,180	12,78	9,29	0,194	833,5	805,2	344,3	4,5	1397	0
Участок 4 по рис. 1, $\delta h_{II} = 0,153$ мм											
5	13,673	0,492	63,94	1,44	0,398	904,7	921,6	305,8	20,1	5547	0,762
6	8,566	0,374	40,08	2,32	0,344	909,5	902,2	301,9	12,5	3208	0,547
7	5,555	0,352	31,17	3,60	0,302	890,4	881,7	352,1	11,3	3374	0,384
8	3,68	0,338	25,02	5,45	0,255	870,8	863,1	408,7	10,5	3650	0,270
9	2,632	0,285	19,10	7,63	0,215	852,9	835,8	424,9	8,3	2885	0,192
10	2,154	0,182	13,19	9,29	0,194	826,3	793,3	370,7	5,0	1257	0,153

В результате большей температуры и меньшего обжатия заднего конца промежуточного раската после клетки № 7 (табл. 2), готовая полоса на участке 4е в клетки № 10е оказывается меньше, чем на переднем участке 2е на $\delta h_{II} = -0,094$ мм.

Из приведенных данных следует, при прокатке на предлагаемом КПС (рис. 2) толщина по длине полосы от участка 2 к участку 4 уменьшается с $h_{10} = 2,0$ мм до $h_{10} = 1,906$ мм. То есть, влияние температурного клина на толщину противоположно относительно прокатки на традиционном ШСПП.

Таблица 2

Параметры прокатки в чистовых клетях № 10 ШСГП 1680 (КПС) полос стали 08пс с размерами сечения $2,0 \times 1030$ мм. Из промежуточного рулона после клетки № 7в, $\Delta t_5 = 65$ °С

№ клетки	h , мм	ε	l_c , мм	v , м/с	f	t_H , °С	t_K , °С	p_{cp} , Н/мм ²	P , МН	N , кВт/ч	δh_{II} , мм
Прокатка участка 2е (передний конец). $H_8 = 5,555$ мм											
8г	3,600	0,352	25,75	5,45	0,258	852,5	849,2	431,7	11,4	4512	0
9д	2,520	0,300	19,62	7,78	0,216	839,4	825,0	453,2	9,1	3693	0
10е	2,000	0,206	14,03	9,8	0,196	815,8	785,3	422,7	6,1	2106	0
Прокатка участка 4е (задний конец). $H_8 = 5,17$ мм											
8г	3,382	0,346	24,52	5,45	0,256	871,4	866,1	424,7	10,7	3620	-0,217
9д	2,386	0,295	18,75	7,78	0,215	847,1	836,0	450,7	8,7	2978	-0,132
10е	1,906	0,201	13,38	9,8	0,195	813,0	792,0	419,4	5,7	1568	-0,094

Обсуждаемые результаты получены при условии, что температура наружного и внутреннего витков рулона перед клетью № 8г одинаковая. В действительности, во время прокатки полосы в клетях № 8г–10е внутренние витки рулона теряют температуру, и это может способствовать выравниванию толщины по длине готовой полосы следующим образом:

Предлагаемое снижение температуры на участке 4, °С	10	20	30	40
Приращение толщины после клетки № 10е, мм	-0,076	-0,062	-0,016	+ 0,002

В любом случае получение горячекатаной полосы с минусовой толщиной на заднем конце (относительно номинальной толщины) обеспечивает повышение точности полосы при холодной прокатке и уменьшение обрезки как на горячекатаной, так и холоднокатаной полосе.

В настоящее время перед чистовыми группами клетей традиционных ШСГП и ЛПМ применяют ППУ (Coilbox), а на некоторых ЛПМ – подогревательные проходные печи. Применение этих устройств может исключить различие температуры по длине промежуточного раската перед чистовой группой ($\Delta t_5 = 0$). И для этого случая производства полос комбинированный полосой стан (КПС) оказывается более эффективным с точки зрения точности полосы по длине. Так, для рассмотренного выше примера прокатки для $\Delta t_5 = 0$ получим (стан 1680, после клетки № 10) участок 4: ШСГП $\delta h_{II} = 0,053$ мм; КПС $h_{II} = 0,009$ мм. Как следует из приведенных данных, на КПС при несколько меньших температурах окончания прокатки точность по длине полосы оказалась выше, чем на традиционном ШСГП. Принимая во внимание, что в практических условиях $\Delta t_5 > 0$, применение стана типа КПС позволяет, за счет регулирования в клетях 8г–10е режимов деформации и температуры полосы, получать готовые полосы с минимальной продольной разнотолщинностью, и очевидно, с требуемыми механическими свойствами.

ВЫВОДЫ

Применение кантовки концевых участков полосы (рулона) на ППУ между подгруппами обеспечивает снижение приращения толщины полосы на заднем концевом участке. Расчеты параметров прокатки полос, выполненных для серийной технологии горячей прокатки полос на ШСГП 1680 и для предлагаемой технологии на комбинированном полосовом стане (КПС), показывают следующее:

- расчетные и экспериментальные значения силы и крутящего момента совпадают между собой с ошибкой до 15 % (клетки № 6–10);
- при серийной технологии прокатки температура переднего конца полосы после клетки № 10 составляет $t_k = 805,2$ °С и на 12 °С больше температуры заднего конца полосы на участке 4, а приращение толщины на участке 4 составляет $\delta h_{II} = 0,153$ мм;
- при прокатке по предлагаемой технологии на КПС получили после клетки № 10е конечную температуру $t_k = 785$ °С, а температура заднего конца на участке 4 оказалась выше

и составила $t_k = 792$ °С. Однако толщина полосы на участке 4 оказалась меньше номинальной на переднем участке 2 ($h = 2,0$ мм) и составила $h_{10} = 1,906$ мм при $\delta h_{II} = -0,094$ мм. Это существенно меньше, чем при серийной прокатке (на 0,247 мм). Полученный по технологии КПС продольный профиль с уменьшением толщины от переднего к заднему концу полосы благоприятен для дальнейшей холодной прокатки, так как обеспечивает уменьшение продольной разнотолщинности и сокращение концевой обрезки как на горячекатаном подкате, так и на холоднокатаной полосе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Минаев А. А. Совмещенные металлургические процессы / А. А. Минаев. – Донецк : Технопарк ДонНТУ УНИТЕХ, 2008. – 552 с.
2. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Производство горячекатаных полос. Книга 1 / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 640 с.
3. Смирнов А. Н. Процессы непрерывной разливки / А. Н. Смирнов, В. Л. Пилюшенко, А. А. Минаев и др. – Донецк : ДонНТУ, 2002. – 536 с.
4. Технология CSP: техника установок и адаптация к расширенным производственным программам / Г. Флеминг, Ф. Хофман, В. Роде, Д. Розенталь // МРТ. – 1994. – С. 46–65.
5. Амелинг Д. Совмещение непрерывного литья тонких слябов с горячей прокаткой в странах Европейского союза / Д. Амелинг, Х. ден Хартог, Р. Штеффен // Черные металлы. – 2002. – № 5. – С. 59–69.
6. Мазур В. Л. Конкурентні позиції підприємств Гірничо-металургійного комплексу України / В. Л. Мазур, О. Б. Скороход // Экономика Украины. – 2009. – № 3. – С. 4–18.
7. Хлопонин В. Н. Непрерывные широкополосные станы горячей прокатки могут ответить на вызов литейно-прокатных агрегатов / В. Н. Хлопонин // Производство проката. – 2001. – № 8. – С. 14–20.
8. Заявка на корисну модель № u2010 12459 від 22.10.2010. Позитивне рішення на видачу ДП від 12.03.2011. Спосіб гарячої прокатки штаб / В. О. Николаев, О. Г. Васильев, А. В. Николаева, А. О. Васильев.
9. Сафьян М. М. Прокатка широкополосной стали / М. М. Сафьян. – М. : Металлургия, 1969. – 460 с.
10. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки / Г. Г. Григорян, Ю. Д. Железнов, В. А. Черный и др. – М. : Металлургия, 1975. – 368 с.
11. Процесс прокатки / М. А. Зайков, В. П. Полухин, А. М. Зайков, Л. Н. Смирнов. – М. : МИСиС, 2004. – 640 с.
12. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев // Справочник. – М. : Металлургия, 1986. – 430 с.
13. Николаев В. А. Теория прокатки / В. А. Николаев. – Запорожье, ЗГИА, 2007. – 228 с.
14. Николаев В. А. Расчет усилий при горячей прокатке / В. А. Николаев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2005. – № 11. – С. 24–30.
15. Николаев В. А. К расчету коэффициента трения при горячей прокатке / В. А. Николаев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1994. – № 11. – С. 21–24.
16. Николаев В. А. Влияние химического состава стали на предел текучести при пластической деформации / В. А. Николаев // Металл и литье Украины. – 2000. – № 11, 12. – С. 5–8.
17. Повышение точности листового проката / И. М. Меерович, А. И. Герцев, В. С. Горелик, Э. Я. Класен. – М. : Металлургия, 1972. – 176 с.
18. Ткалич К. Н. Точная прокатка тонких полос / К. Н. Ткалич, Ю. В. Коновалов. – М. : Металлургия, 1972. – 176 с.
19. Николаев В. А. Влияние обжатия в первой клетки чистой группы ШСГП на параметры прокатки полос / В. А. Николаев, Д. А. Матюшенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 5. – С. 57–60.
20. Николаев В. А. Определение продольной разнотолщинности горячекатаных полос / В. А. Николаев, Д. А. Матюшенко // Металл и литье Украины. – 2007. – № 8. – С. 20–22.
21. Условия производства особотонкой горячекатаной полосовой стали на комбинате «Запорожсталь» / А. И. Молчанов, С. Л. Солтан, В. П. Яланский и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 8, 9. – С. 11–14.

Николаев В. А. – д-р техн. наук, проф. ЗНТУ;

Васильев А. Г. – инженер ЗНТУ;

Васильев А. А. – соискатель ЗНТУ;

ЗНТУ – Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье.

E-mail: senator0023@hotmail.ru