

УДК 669.18.046.518:621.746

Э. В. Парусов, к. т. н.; А. Б. Сычков, д. т. н. проф.; И. Н. Чуйко, к. т. н.;
Л. В. Сагура, к. т. н.; А. И. Сивак

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАЗЛИВКИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СТАЛИ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

С целью повышения скорости разливки жидкой стали высокоуглеродистых марок в ходе выполнения исследований опробованы опытные технологические режимы разливки и кристаллизации непрерывнолитой заготовки.

По сравнению с заготовками, разлитыми с применением действующего режима охлаждения, достигнуто снижение пораженности заготовок трещинами и центральной пористостью.

На основании проведенных исследований установлено, что при производстве непрерывнолитой заготовки из высокоуглеродистых марок стали С80D и С86D представляется возможным повысить скорость вытягивания (разливки) до 3,2 м/мин, что позволит снизить технологическое время производства одной плавки при сохранении удовлетворительных качественных показателей заготовки.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, скорость разливки, высокоуглеродистая сталь, качественные показатели заготовки.

Введение и состояние проблемы. Наследственное влияние качественных показателей непрерывнолитой заготовки на свойства горячекатаного проката является общеизвестным и изложено в работах [1 – 5], однако разливка жидкой стали на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) имеет ряд особенностей, которые определяют качественные показатели литой заготовки и зависят, в первую очередь, от параметров технологического процесса производства и конструктивных особенностей применяемого оборудования. В макроструктуре заготовки всегда наблюдаются дефекты, которые не могут быть полностью устранены даже при рациональном выборе технологических параметров производства и которые напрямую связаны с ликвационными процессами, протекающими при кристаллизации.

По сравнению со слитками, отлитыми в изложницы, кристаллическое строение литой заготовки имеет некоторые особенности. Это связано с её интенсивным охлаждением в кристаллизаторе и зоне вторичного охлаждения (ЗВО), что в конечном итоге способствует формированию более однородной кристаллической структуры. Непрерывнолитая заготовка, в отличие от слитка, характеризуется весьма незначительными колебаниями химического состава (полное исключение зональной и снижение микрофизической (дендритной) ликвации) и более однородными свойствами как в продольном, так и поперечном направлениях [6].

Формирование качественных показателей непрерывнолитой заготовки (размер структурных зон, центральная осевая пористость, осевая ликвация, трещины и др.) определяют в основном технологическими параметрами процесса разливки жидкой стали. Существенное влияние при этом оказывает температура металла в промежуточном ковше и последующая скорость вытяжки заготовки [1]. Повышение перегрева металла над температурой ликвидус при разливке металла увеличивает протяженность зоны столбчатых кристаллов, величина которой также зависит и от содержания углерода в стали [2, 7, 8].

В соответствии с последними мировыми тенденциями ведущии компании-производители

металлургического оборудования (Danieli, Concast Standard, Siemens VAI и др.) внедряют прогрессивные технологические режимы непрерывной разливки высокоуглеродистых марок стали, которые характеризуются повышением интенсивности водяного охлаждения заготовки на первых двух секциях ЗВО, что способствует повышению скорости кристаллизации металла.

Компания Danieli рекомендует при производстве заготовок из высокоуглеродистых марок стали вести охлаждение в ЗВО с интенсивностью расхода воды около 1,6 л/кг, а компания Concast Standard является сторонником более интенсивного водяного охлаждения ~ 2,0 л/кг. При этом рекомендуется применение высокоскоростных форсунок в кристаллизаторе, например фирмы Lechner. Согласно утверждениям первых двух компаний, при совмещении таких режимов охлаждения с технологией электромагнитного перемешивания (ЭМП) металла в кристаллизаторе становится возможным повысить скорость разливки стали, снизить развитие ликвационных процессов и уменьшить балл центральной пористости в литой заготовке.

Ввиду изложенного *целью работы* являлось исследование влияния технологических параметров разливки и интенсивности охлаждения высокоуглеродистой стали марок С80D и С86D (по EN ISO 16120-1:2011) в ЗВО на формирование качественных показателей непрерывнолитой заготовки сечением 125×125 мм.

Материалами для исследований служили промышленные партии непрерывнолитой заготовки сечением 125×125 мм из стали марок С80D и С86D, изготовленные в условиях ОАО «Молдавский металлургический завод» (г. Рыбница, Молдова) с применением различных скоростей кристаллизации жидкой стали и интенсивностью водяного охлаждения в ЗВО. Исследование степени развития дефектов в макроструктуре непрерывнолитой заготовки, предназначенной для изготовления бунтового проката, проводили в соответствии с требованиями ОСТ 14-1-235-91 «Сталь. Метод контроля макроструктуры непрерывнолитой заготовки для производства сортового проката и трубных заготовок». Макроструктуру литой заготовки выявляли методом глубокого травления темплетов в горячем 50-процентном водном растворе соляной кислоты в соответствии с требованиями ГОСТ 10243-75 «Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры». Оценка характерных дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки (центральная осевая пористость, осевая ликвация и т.д.) выполнена методом сравнения натуральных протравленных темплетов с эталонными шкалами ОСТ 14-1-235-91.

Проведение экспериментов и обсуждение полученных результатов. Перед углубленным проведением исследований была опробована опытная технология разливки высокоуглеродистой стали марки С80D при повышении средней скорости вытяжки литой заготовки с 2,4 м/мин до 3,4 м/мин и сохранении действующего режима в ЗВО. Установлено, что по сравнению с действующей технологией разливки жидкой стали (2,4 м/мин) на опытном режиме (3,4 м/мин) повысилась пораженность макроструктуры заготовки трещинами на 1,0 балл, а центральная пористость возросла в среднем на 1,4 балла (рис. 1). Помимо указанных отклонений по качественным показателям для заготовок, произведенных по опытному режиму, зафиксирована повышенная выпуклость граней до 2,8 мм на сторону.

Химический состав стали марки С80D двух контрольных плавов и параметры экспериментальных режимов в ЗВО при разливке заготовок представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Химический состав стали марки С80D

Номер плавки	Химический состав стали, % по масс.							
	С	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1	0,79	0,64	0,16	0,010	0,002	0,05	0,04	0,12
2	0,81	0,59	0,15	0,009	0,003	0,04	0,03	0,14

Таблица 2

Параметры охлаждения непрерывнолитой заготовки из стали марки С80D сечением 125×125 мм в ЗВО

Номер режима	Средняя скорость разливки, м/мин	Удельный расход воды в ЗВО, л/кг	Доля от общего расхода воды в секции			
			1 секция	2 секция	3 секция	4 секция
1	2,4	1,35	0,36	0,36	0,17	0,11
2	3,2	1,70	0,30	0,39	0,18	0,13
3	2,6	1,60	0,30	0,40	0,18	0,12
4	2,8	1,85	0,29	0,39	0,19	0,13

В процессе разливки стали осуществляли фиксацию основных параметров и отклонений технологического процесса, визуально оценивали изменение температуры (переохлаждения) заготовки, выполняли замеры геометрических параметров (кривизна, ромбичность, выпуклость граней). От заготовок, изготовленных по базовому и экспериментальным технологическим режимам, проводили отбор темплетов для исследования качественных показателей макроструктуры.



Рис. 1. Макроструктура продольного темплета непрерывнолитой заготовки из стали С80D (скорость вытяжки 3,4 м/мин; удельный расход воды в ЗВО 1,30 л/кг)

Результаты исследований макроструктуры непрерывнолитых заготовок сечением 125×125 мм в соответствии с требованиями ОСТ 14-1-235-91, изготовленных по базовому и экспериментальным технологическим режимам, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Качественные показатели непрерывнолитой заготовки сечением 125×125 мм из стали марки С80D по ОСТ 14-1-235-91

Номер режима	Средняя скорость разливки, м/мин	t _{ск} ¹ , °С	Качественные показатели заготовки, балл					
			ЦП ²	ОЛ ³	Трещины			КТЗ ⁴
					по сечению	угловые	осевые	
1	2,4	1502	2,1	2,5	1,1	0,2	0,4	0,3
2	3,2	1499	1,6	2,2	0,4	0,2	0,4	0,4
3	2,6	1498	1,9	2,3	1,2	0,1	0,4	0,5
4	2,8	1502	1,7	2,4	0,3	0,3	0,5	0,6

Примечание: 1 – температура металла в сталеразливочном ковше; 2 – центральная осевая пористость; 3 – осевая ликвация (химическая неоднородность); 4 – краевое точечное загрязнение

Из анализа представленных в табл. 3 данных по исследованию качественных показателей заготовки, изготовленной как по действующему, так и по опытному технологическим режимам, следует:

- при использовании режима № 2 достигнуто снижение среднего балла по центральной осевой пористости на 0,5 балла, уменьшение пораженности трещинами по сечению на 0,7 балла;
- при использовании режима № 3 существенного улучшения качественных показателей заготовки не выявлено;
- при использовании режима № 4 достигнуто снижение среднего балла по центральной осевой пористости на 0,4 балла, уменьшение пораженности трещинами по сечению на 0,8 балла.

При опробовании наиболее интенсивного режима охлаждения (№ 4) зафиксировано значительное переохлаждение поверхности заготовок в ЗВО, что вызывало повышенную их искривленность. В целом геометрические размеры непрерывнолитых заготовок, изготовленных с использованием опытных технологических режимов водяного охлаждения (№ 2...4), в 95 % случаев соответствовали требованиям ЗТУ 14-518-2012-0001-2009 «Заготовка непрерывнолитая квадратного сечения для изготовления сортового проката и катанки».

В ходе проведения исследований было установлено, что при повышении интенсивности охлаждения в ЗВО представляется возможным увеличить среднюю скорость разливки высокоуглеродистой стали до 3,2 м/мин без ухудшения качественных показателей литой заготовки.

Существенного снижения развития осевой ликвации в заготовках за счет применения более интенсивных режимов водяного охлаждения в ЗВО не достигнуто. Однако отсутствие должного эффекта может быть связано с недостаточно высоким давлением охлаждающей воды на поверхности литой заготовки в ЗВО. Максимальное давление воды в первых двух секциях ЗВО в ходе проведения исследований составляло ~ 0,7 МПа. В соответствии с рекомендациями компаний Danieli и Concast Standard при использовании технологии высокоинтенсивного водяного охлаждения заготовки из высокоуглеродистых марок стали для уменьшения развития уровня осевой ликвации давление охлаждающей воды в ЗВО должно составлять не менее 1,2 МПа.

Дальнейшие исследования проводили на двух контрольных плавках высокоуглеродистой стали марки С86D, химический состав которых приведен в табл. 4.

Таблица 4

Химический состав стали марки С86D

Номер плавки	Химический состав стали, % по масс.							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
1	0,84	0,59	0,18	0,011	0,001	0,04	0,06	0,14
2	0,83	0,61	0,17	0,010	0,002	0,03	0,05	0,13

В ходе проведения исследований продольные темплеты отбирали от заготовок обеих контрольных плавки с ручьев № 1 и 6 МНЛЗ, скорость вытяжки заготовок на которых составляла 2,43 и 3,28 м/мин соответственно.

Разливку жидкой стали выполняли по аналогии со сталью марки С80D через промежуточный ковш с магниальной футеровкой с полной защитой струи металла от вторичного окисления и использованием системы ЭМП металла в кристаллизаторе.

Средняя скорость вытягивания заготовки по шести ручьям МНЛЗ составляла: ручей № 1 – 2,41...2,43 м/мин, ручьи № 2...5 – 2,38...2,70 м/мин, ручей № 6 – 3,21...3,28 м/мин (рис. 2).

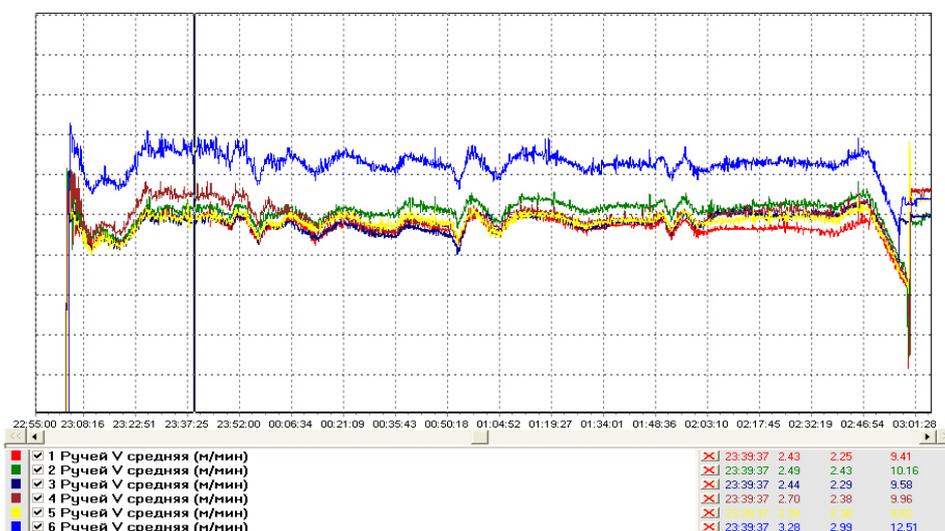


Рис. 2. Средняя скорость вытягивания непрерывной заготовки сечением 125×125 мм из стали марки С86D на шестиручевой МНЛЗ согласно данным АСУТП ОАО «ММЗ»

Параметры экспериментальных режимов охлаждения заготовок в ЗВО представлены в табл. 5.

Таблица 5

Параметры охлаждения непрерывной заготовки сечением 125×125 мм из стали марки С86D в ЗВО

Номер ручья МНЛЗ	Удельный расход воды в ЗВО, л/кг ²	Доля от общего расхода воды в секции			
		1 секция	2 секция	3 секция	4 секция
1	1,60	0,31	0,38	0,18	0,13
2...5	1,65	0,29	0,39	0,17	0,15
6	1,75	0,30	0,40	0,18	0,12

Результаты исследований макроструктуры и кристаллической структуры непрерывнолитых заготовок контрольных плавов из стали марки С86D представлены в табл. 6 и 7 соответственно.

Таблица 6

Качественные показатели непрерывнолитой заготовки сечением 125×125 мм из стали марки С86D

Номер плавки/ Номер ручья МНЛЗ	Оценка макроструктуры заготовки по ОСТ 14-1-235-91, балл					КТЗ*
	ЦП*	ОЛ*	Трещины			
			по сечению	угловые	осевые	
1 / 1	2,0	2,4	0	0,3	0,5	0,3
1 / 6	1,8	2,2	0	0,3	0,4	0,4
2 / 1	1,9	2,5	0	0,2	0,5	0,5
2 / 6	1,7	2,3	0	0,3	0,5	0,5

Примечание: * – см. примечание к табл. 3

Таблица 7

Результаты исследования кристаллической структуры непрерывнолитой заготовки сечением 125×125 мм из стали марки С86D

Номер ручья МНЛЗ	Размеры структурных зон исследуемых заготовок ¹ , мм		
	Корковая зона	Столбчатые кристаллы	Равноосные кристаллы
1	<u>3...11</u>	<u>11...17</u>	<u>30...35</u>
	7,5	13,4	32,8
6	<u>4...10</u>	<u>13...18</u>	<u>31...36</u>
	7,1	14,8	33,1

Примечание: 1 – в числителе усредненные максимальное и минимальное значения, в знаменателе – среднее

Анализ данных табл. 6...7 свидетельствует о том, что существенных отличий по показателям макроструктуры и кристаллической структуры литых заготовок контрольных плавов, отлитых со средней скоростью 2,43 и 3,28 м/мин, не выявлено.

Для оценки развития дефектов в осевой зоне заготовок, отлитых с различными скоростями вытягивания, были отобраны темплеты длиной около 1 м, порезаны вдоль центральной линии и отшлифованы. Результаты оценки пораженности центральной зоны заготовок дефектами (центральная пористость) представлены в табл. 8.

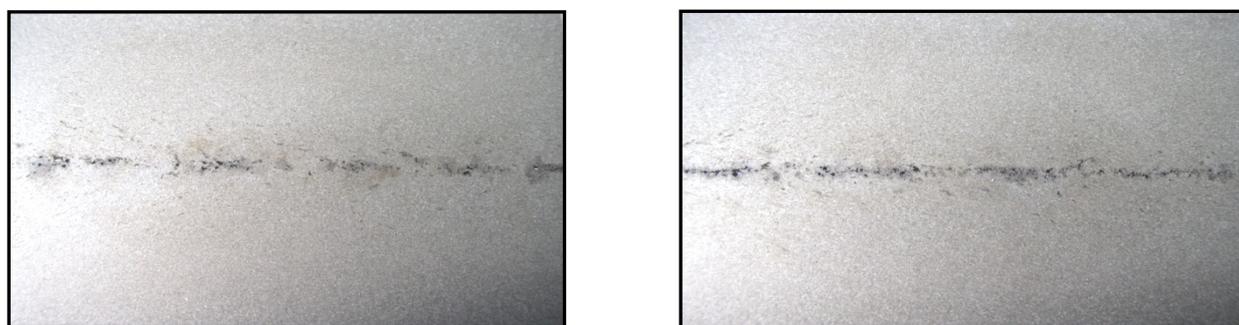
Непрерывнолитые заготовки обеих плавов, отлитые с более высокой скоростью вытягивания 3,21...3,28 м/мин, характеризуются повышенным количеством и максимальным размером пор в осевой зоне по сравнению с заготовками, отлитыми со скоростью вытягивания 2,41...2,43 м/мин.

Заготовки обеих контрольных плавов, изготовленные с применением различных режимов разлива и кристаллизации стали, были прокатаны на проволочном стане в бунтовой прокат диаметром 11,0 мм. Нарушение целостности и отклонений по качеству поверхности бунтового проката контрольных плавов не обнаружено. Следовательно, дефекты центральной зоны литой заготовки контрольных плавов, разлитых со средней скоростью в диапазоне скоростей 2,41...3,28 м/мин, закатали в процессе горячей деформации.

Результаты оценки центральной пористости в непрерывнолитых заготовках сечением 125×125 мм из стали марки С86D

Номер плавки	Номер ручья МНЛЗ	Средняя скорость разливки стали, м/мин	Количество пор по длине темплета, шт.	Размер пор, мм	Зона расположения пор
1	1	2,43	80	0,5...1,0 (макс. – 2,1)	участок шириной ~ 5,0 мм
	6	3,28	127	0,5...1,0 (макс. – 2,8)	участок шириной ~ 5,0 мм
2	1	2,41	78	0,5...1,0 (макс. – 2,2)	участок шириной ~ 5,0 мм
	6	3,21	114	0,5...1,0 (макс. – 3,0)	участок шириной ~ 5,0 мм

На рис. 3 представлена макроструктура продольных темплетов исследуемых контрольных плавок.



а

б

а – средняя скорость вытягивания заготовки 2,43 м/мин;

б – средняя скорость вытягивания 3,28 м/мин

Рис. 3. Макроструктура продольных темплетов непрерывнолитой заготовки из стали С86D, отлитой с различными скоростями

Центральная пористость имеет значительное развитие в заготовках малого сечения, рост степени пораженности данным типом дефекта фиксируют при повышении скорости разливки стали.

Из-за протяженной лунки жидкого металла в кристаллизаторах использование ЭМП металла на МНЛЗ не позволило значительно повлиять на уровень центральной пористости в литой заготовке. Более эффективным методом снижения балла центральной пористости является применение комплексного ЭМП металла не только в кристаллизаторе, но и в ЗВО при одновременном повышении интенсивности водяного охлаждения.

Влияние рассмотренного дефекта литой заготовки на качество готового проката все же стоит считать ограниченным. Наиболее важным является ограничение развития данного дефекта непрерывнолитой заготовки при производстве высокоуглеродистой стали кордового назначения ввиду опасности возможного расслоения высокопрочной проволоки при волочении до диаметра менее 0,50 мм за счет возможности возникновения дефекта типа «лунка-конус».

Ограничение развития центральной осевой пористости в непрерывнолитой заготовке может быть достигнуто за счет постоянства скорости разливки, а также более интенсивного и равномерного охлаждения в ЗВО.

Выводы

1. С целью повышения скорости разливки жидкой стали высокоуглеродистых марок в ходе выполнения исследований опробованы опытные технологические режимы разливки и кристаллизации непрерывнолитой заготовки. Наиболее оптимальные результаты по качеству заготовки были достигнуты при удельном расходе воды в ЗВО 1,55...1,75 л/кг стали.

2. По сравнению с заготовками, разлитыми с применением действующего режима охлаждения, достигнуто снижение пораженности заготовок трещинами и центральной пористостью. Геометрические параметры заготовок, произведенных с применением более интенсивных режимов водяного охлаждения, показали полное соответствие требованиям ЗТУ 14-518-2012-0001-2009. При опробовании опытного режима с максимальным удельным расходом воды 1,85 л/кг металла отмечено значительное переохлаждение поверхности заготовок и повышение их искривленности.

3. На основании проведенных исследований установлено, что при производстве непрерывнолитой заготовки из высокоуглеродистых марок стали С80D и С86D представляется возможным повысить скорость вытягивания (разливки) до 3,2 м/мин, что позволит снизить технологическое время производства одной плавки при сохранении удовлетворительных качественных показателей заготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ершов Г. С. Микронеоднородность металлов и сплавов / Г. С. Ершов, Л. А. Позняк. – М. : Металлургия, 1985. – 214 с.
2. Голиков И. Н. Дендритная ликвация в сталях и сплавах / И. Н. Голиков, С. Б. Масленков. – М. : Металлургия, 1977. – 224 с.
3. Теория и практика непрерывного литья заготовок / [Смирнов А. Н., Гладков А. Я., Пилюшенко В. Л. и др.]. – Донецк : ООО «Лебедь», 2000. – 371 с.
4. Трансформация дефектов непрерывно-литой заготовки в поверхностные дефекты проката / А. Б. Сычков, М. А. Жигарев, А. В. Перчаткин [и др.] // *Металлург.* – 2006. – № 2. – С. 60 – 64.
5. The transformation of defects in continuous-cast semifinished products into surface defects on rolled products / A. V. Sychkov, M. A. Zhigarev, A. V. Perchatkin [and etc.] // *Metallurgist.* – Januar 2006. – Vol. 50. – Issue 1 – 2. – P. 83 – 90.
6. Гольдштейн Я. Е. Использование железуглеродистых сплавов // Я. Е. Гольдштейн, В. Г. Мизин. – М. : Металлургия, 1993. – 416 с.
7. Парусов В. В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки // В. В. Парусов, А. Б. Сычков, Э. В. Парусов. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2012. – 376 с.
8. Металлургические и металловедческие аспекты производства высокоуглеродистой катанки / [Сычков А. Б., Жигарев М. А., Столяров А. Ю. и др.]. – Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2014. – 257 с.

Парусов Эдуард Владимирович – к. т. н., с. н. с., и. о. заведующего отделом термической обработки металла для машиностроения, tometal@ukr.net.

Институт чёрной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины (ИЧМ НАНУ).

Сичков Александр Борисович – д. т. н., проф., профессор кафедры литейного производства и материаловедения, absychkov@mail.ru.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (МГТУ).

Чуйко Игорь Николаевич – к. т. н., научный сотрудник отдела термической обработки металла для машиностроения, ichuuko@mail.ru.

Сагура Людмила Владимировна – к. т. н., старший научный сотрудник отдела термической обработки металла для машиностроения, slv_metal@mail.ru.

Сивак Алла Ивановна – старший научный сотрудник отдела термической обработки металла для машиностроения, slv_metal@mail.ru.

Институт чёрной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины (ИЧМ НАНУ).