

с водой за счет увеличения ширины струи на 5 – 30 % по сравнению с другими способами продувки.

Следует отметить, что при продувке с непрерывной вибрацией в горизонтальной плоскости увеличение зоны контакта воздуха с водой происходит как за счет увеличения ширины струи, так и за счет большего количества образующихся полостей меньшего размера (пузырей), занятых воздухом.

Таким образом, при использовании погружных трубок традиционной конструкции с непрерывной вибрацией в горизонтальной плоскости и с двумя дополнительными боковыми отверстиями существенно увеличивается зона контакта газа с жидкостью, что приводит к ускорению протекания экзотермических реак-

ций окисления компонентов расплава, и как следствие, повышению производительности печи, эффективности использования кислорода, снижению угара металла и удельного расхода кислорода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сосонкин О.М., Шишимиров М.В. и др. Совершенствование и модернизация технологий сталеплавильного производства: Монография. / Под ред. Кудрина В.А. – М.: МГВМИ, 2011. С. 169–183.

© 2012 г. М.В. Шишимиров, О.М. Сосонкин,
С.И. Герцык, Н.П. Ялов, М.В. Смирнова,
Т.С. Шарыпова, Е.В. Дьякова
Поступила 24 мая 2012 г.

УДК 621.73.002.6:658.562

Д.В. Руцкий, Н.А. Зюбан, А.Н. Галкин, С.Б. Гаманюк

Волгоградский государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ КУЗНЕЧНЫХ СЛИТКОВ НА ИХ СТРОЕНИЕ И КАЧЕСТВО ПОКОВОК*

Повышенные требования к изделиям тяжелого машиностроения обуславливают необходимость получения кованных заготовок высокого качества. Крупногабаритные кованные изделия: судовые валы, ротора турбогенераторов, корпусные и трубные заготовки для энергетических агрегатов изготавливаются из кузнечных слитков, вес которых в два раза выше веса готового изделия. Увеличение массы слитка приводит к интенсивному развитию явлений усадки и ликвации, и, как следствие, повышенной физической и химической неоднородности, а также другим неконтролируемым дефектам, присущим процессу затвердевания больших масс металла [1]. Используемые кузнечные слитки в основном ориентированы на получение плотной осевой зоны, вследствие чего имеют значительный объем прибыльной части (в среднем до 20 %) и отличаются между собой параметром H/D и величиной конусности [2, 3]. Большой объем прибыльной части ограничивает возможность эффективного снижения отходов слитка при его ковке. Другой, не менее важной проблемой качества таких слитков является интенсивное развитие химической ликвации по высоте слитка (в частности углерода), что может привести к браку получаемых из них поковок.

Машиностроительные предприятия энергетической и транспортной отраслей производят поковки самой широкой номенклатуры, причем до 80 % из них являются полыми (валы роторов турбогенераторов, кольца, толстостенные трубы, обечайки, корпусные детали и др.) [3]. В этом случае, с целью уменьшения отходов при ковке, как правило, стараются применять удлиненные и бесприбыльные слитки. Однако, в связи с разнообразием конструктивных особенностей получаемых заготовок, не всегда данные технологические мероприятия приносят ожидаемый результат. В целях улучшения качественных характеристик изделий и экономических показателей производства перспективным направлением является применение слитков с захоленной верхней частью [4, 5]. Вместо «классической» прибыльной надставки используется надставка-холодильник с относительным объемом 4 % (см. рис. 1). В этом случае компенсация усадки в теле слитка будет продолжаться до тех пор, пока поверхности раздела фронта кристаллизации, движущиеся в горизонтальном направлении от боковых стенок изложницы, не сблизятся на достаточную величину, чтобы обеспечить в осевой зоне получение вытянутой узкой усадочной раковины. Металл центральной части тела слитка со следами усадочной раковины удаляется в ходе последующей обработки прошивкой или сверлением заготовки.

Химический состав металла, геометрические и технологические параметры отливки слитков приведены в таблицах 1, 2.

* Работа выполнена в рамках проекта МК – 4034.2012.8 «Разработка оптимальной конфигурации и технологии отливки кузнечных слитков в вакууме с контролируемым развитием дефектных зон литого металла с целью повышения качества и надежности крупногабаритных изделий энергетического машиностроения».

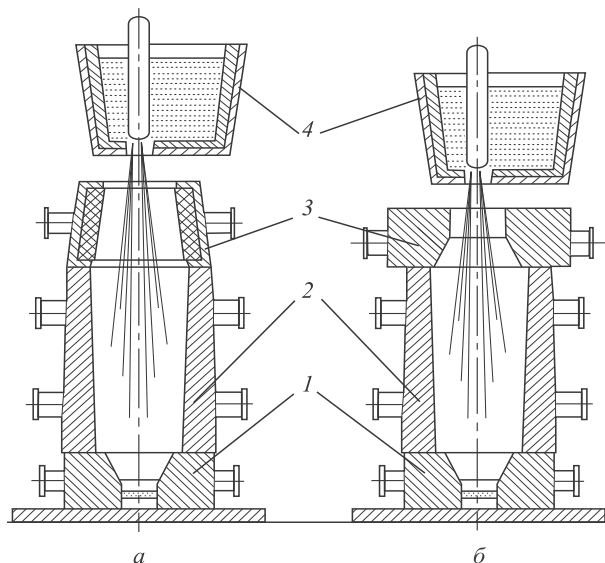


Рис. 1. Схема отливки слитков с утепляющей (а) и захлаживающей (б) прибыльной надставкой:

1 – поддон; 2 – изложница; 3 – утепляющая и ускоряющая кристаллизацию надставка; 4 – разливочный ковш

Результаты исследований макроструктурной, физической и химической неоднородности слитков стали 38ХНЗМФА, отлитых с обычными утепляющими надставками и надставкой-холодильником представлены в табл. 3 и 4.

Из приведенных данных видно, что в опытном слитке зона осевой рыхлости имеет почти в два раза меньший диаметр и меньшую протяженность по сравнению с обычным слитком. Это объясняется сокращением зоны затрудненного питания на заключительном этапе кристаллизации слитка и, соответственно, лучшими условиями ее подпитки жидким металлом.

Усадочная раковина в опытном слитке сконцентрирована в осевой части и имеет небольшое развитие по шири-

не (23,1 % среднего диаметра), при этом значительно развита по высоте (50,4 % высоты тела слитка) (см. табл. 3). Такое расположение усадочной раковины обеспечивает ее практически полное удаление при деформационной обработке слитка и получении полой поковки.

Анализ данных по развитию химической неоднородности (см. табл. 4) показывает, что в слитке с надставкой-холодильником она выражена существенно слабее, что можно объяснить более равномерным распределением по высоте слитка таких сильно ликвирующих элементов, как углерод, сера и фосфор.

Замедление процесса перераспределения ликвирующих примесей и уменьшение степени развития химической неоднородности обусловлено более интенсивными процессами кристаллизации, проходящими в опытном слитке, за счет охлаждающего воздействия не только со стороны поддона, но и в верхней части слитка со стороны массивной прибыльной надставки. Для уточнения механизма кристаллизации слитка с захлаживающей прибыльной надставкой в лабораторных условиях на плоских моделях изложниц [6] было проведено физическое моделирование процессов отливки и затвердевания слитков с различной скоростью затвердевания головной части с целью выявления особенностей их строения и развития структурных зон.

Результаты расчета масштабов моделируемого процесса приведены в табл. 5. Приведенные данные свидетельствуют о сопоставимости процессов кристаллизации, протекающих в изложнице, наполненной жидкой сталью 38ХНЗМФА, и на лабораторной установке с моделирующим веществом – гипосульфит.

В процессе проведения экспериментов продвигающийся фронт кристаллизации разделяли на две составляющие: горизонтальную – твердую фазу, нарастающую последовательно от боковых стенок к центру изложницы, и вертикальную – характеризующую про-

Таблица 1

Химический состав ковшевых проб стали

Слиток	$m_{сл}, \text{Т}$	Содержание элементов, %									
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V
Обычный	4,50	0,41	0,52	0,39	0,015	0,017	0,11	0,15	0,12	–	–
Опытный	1,53	0,34	0,48	0,33	0,014	0,008	1,42	3,25	0,10	0,38	0,11

Таблица 2

Геометрические размеры слитков и технологические параметры их разливки

Слиток	$m_{сл}, \text{Т}$	H/D	$k_{те}^*, \%$	$V_{пр}, \%$	$T_{вып}, ^\circ\text{C}$	$T_{разл}, ^\circ\text{C}$	$\tau_{тела}, \text{мин}$	$\tau_{пр}, \text{мин}$
Обычный	4,5	2,16	1,5	16,67	1665	1570	2,70	1,30
Опытный	1,53	1,99	6,1	4,00	1640	1570	1,55	1,10

* Здесь и далее приведены значения конусности на обе стороны

Таблица 3

Структурные параметры слитков

Параметр	Слиток с утепляющей надставкой	Слиток с захолаживающей надставкой
Корковая зона:		
средняя ширина зоны, мм	15	10,5
% к площади осевого темплета	5,7	3,0
Зона столбчатых дендритов:		
средняя ширина зоны, мм	55	96,1
% к площади осевого темплета	11,9	53,2
средний размер кристаллов, мм	49	42
средний угол наклона к горизонту, град	22	14
Зона крупных различно ориентированных дендритов:		
% к площади осевого темплета	49,0	31,4
средний размер кристаллов, мм	9,1	8,6
средний угол наклона, град	41,7	57
Конус осаждения:		
высота, мм	685	204
% к высоте тела слитка	43,1	20,8
максимальный диаметр, мм	487	158
% к среднему диаметру тела слитка	76,1	34,3
% к площади осевого темплета тела слитка	26,7	3,5
средний размер кристаллов, мм	5,1	3,6
средний угол наклона, град	53,2	62
Зона осевой рыхлости:		
протяженность, мм	720	391
% к высоте тела слитка	52,2	39,9
максимальный диаметр, мм	100	37
% к среднему диаметру слитка	15,6	8,0
% к площади осевого темплета тела слитка	6,6	1,7
средний размер кристаллов, мм	5,7	12,5
средний угол наклона, град	54	53
Усадочная раковина:		
протяженность, мм	220	494
% к высоте тела слитка	—	50,4
% к площади осевого темплета тела слитка	—	7,2
максимальный диаметр в теле слитка, мм	—	111,4
% к среднему диаметру тела слитка	—	23,1

Таблица 4

Химическая неоднородность слитков

Параметр	Слиток с утепляющей надставкой	Слиток с захолаживающей надставкой
Положительная ликвация, %:		
углерод	+10,8	+3,0
сера	+18,8	+7,1
фосфор	+18,0	0
Отрицательная ликвация, %:		
углерод	–8,1	–3,0
сера	–6,3	–14,3
фосфор	–9,1	–11,1
Суммарная ликвация, %:		
углерод	18,9	6,0
сера	25,1	21,4
фосфор	27,1	11,1

Таблица 5

**Расчет масштабов моделирования кристаллизации
слитка с вогнутой донной частью**

Параметр	Обозначение параметра	Значение масштаба
Временной масштаб моделирования	μt	0,67
Линейный масштаб	μe	4,28
Масштаб подобия интенсивности теплоотдачи	μa	1,12
Масштаб подобия температурных перепадов	$\mu \Delta t$	3,65
Масштаб подобия тепловых потоков	μq	4,09
Масштаб подобия интенсивности динамического воздействия	μE	4,98

движение твердой фазы в направлении от низа изложницы к ее центру.

Результаты моделирования показали (рис. 2), что в опытном слитке скорость нарастания твердой фазы в горизонтальном направлении существенно превышает аналогичный параметр для сравнительного слитка, а к концу затвердевания, когда процессы перераспределения примесей получают наибольшее развитие, эта разница увеличивается до двух и более раз.

Таким образом, интенсивное развитие процесса последовательной кристаллизации способствует подавле-

нию ликвационных процессов и выравниванию химического состава металла по высоте и сечению слитка.

Полученные результаты показали, что слиток с заохложденной верхней частью может быть использован для производства полых поковок. Узкая усадочная раковина, сконцентрированная в осевой зоне и верхней части слитков, будет гарантированно удаляться при ковке слитков и сверлении полученных поковок.

Для подтверждения результатов исследования была проведена промышленная отливка слитков стали 15Х2МФА массой 13,56 и 12,14 т, геометрические параметры которых и технологические факторы разливки представлены в табл. 6.

Из данных слитков ковкой получали полые заготовки, из которых в соответствии со схемой на рис. 3 отбирались пробы для проведения химического анализа и определения механических свойств.

Схема распределения углерода в исходных сравнительном и опытном слитках массой 13,56 и 12,14 т соответственно представлена на рис. 4.

Нижняя часть слитка традиционной формы характеризуется пониженным содержанием углерода (см. рис. 4, а). В подприбыльной области содержание углерода повышено, что соответствует общепринятым представлениям о ликвации в крупных кузнечных слитках. В слитке с заохложденной верхней частью наблюдается более однородное распределение углерода (см. рис. 4, б).

Область скопления ликвидирующих примесей в опытном слитке менее выражена и сосредоточена в центральной части слитка, удаляемой в отходы, годная часть поковки характеризуется высокой однородностью по хи-

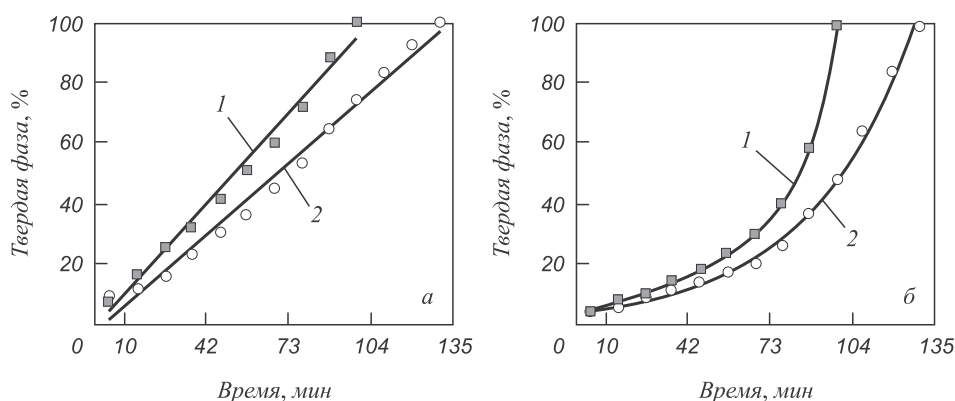


Рис. 2. Продвижение вертикального (а) и горизонтального (б) фронтов кристаллизации слитков с различными надставками: 1 – надставка-холодильник; 2 – утепляющая надставка

Таблица 6

Геометрические параметры и технологические факторы отливки слитков

$m_{сл}$, т	H/D	$k_{тс}$, %	$V_{пр}$, %	$T_{вып}$, °C	$T_{разл}$, °C	$\tau_{тела}$, мин	$\tau_{пр}$, мин
13,56	2,05	9,0	17,6	1655	1570	5,10	3,80
12,14	2,05	9,0	4,0	1655	1570	5,15	2,35

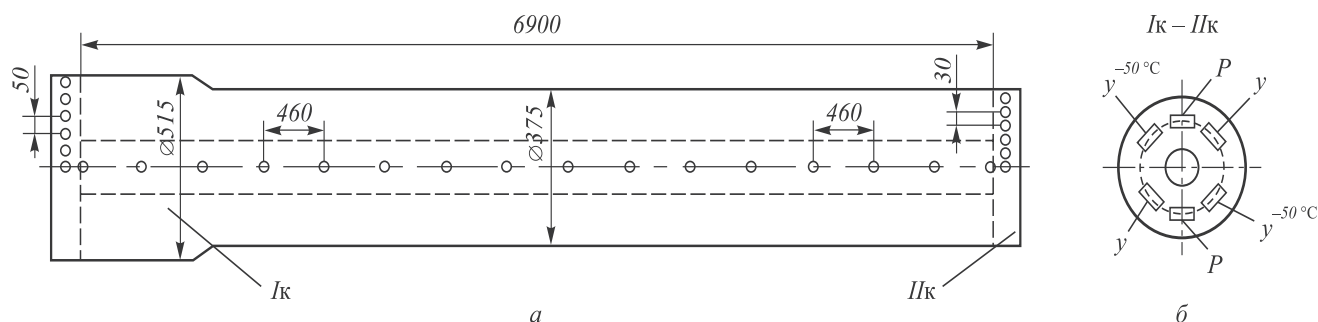


Рис. 3. Схема отбора концевых дисков (а) и образцов для определения уровня механических свойств (б) поковок из слитков массой 13,56 и 12,14 т: I_k – первый конец поковки, соответствующий донной части слитка; II_k – второй конец поковки, соответствующий прибыльной части слитка; У – ударные образцы; Р – разрывные образцы

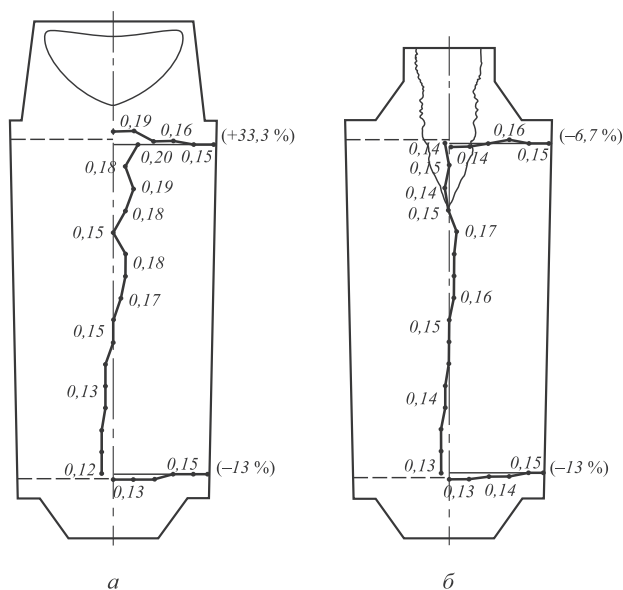


Рис. 4. Распределение углерода по высоте и сечению слитков массой 13,56 т, отлитых в изложницу с утепляющей надставкой (а) и массой 12,14 т с надставкой-холодильником (б)

мическому составу. Особенностью слитка с захоложенной верхней частью является то, что как в нижней, так и в верхней его частях ликвация имеет отрицательные значения. Такое различие в распределении элементов в объеме слитков с различными типами надставок объясняется особенностями их кристаллизации. В слитке традиционной формы в последнюю очередь затвердевает головная его часть, поэтому максимальное количество ликвирующих примесей, оттесняемых в процессе кристаллизации, концентрируются в ней и в подприбыльной области. При использовании надставки-холодильника последние порции металла, обогащенные ликватами, застывают в узкой центральной части слитка, затвердевающей последней, а верхние и нижние горизонты практически идентичны по химическому составу.

Расчет суммарной ликвации углерода сравниваемых слитков показал, что в обычном слитке она составляет 46,3 %, а в слитке с захоложенной верхней частью всего 6,3 %, что свидетельствует о существенном подавлении развития химической неоднородности.

Готовые полые изделия проходили штатные испытания в соответствии с нормативно-техническим регламентом. Пробы для исследования качественных характеристик металла полых поковок отбирались из колец толщиной 20 мм. Контролю подвергались два кольца, по одному от каждого конца поковки, что соответствует донной и головной частям слитка (см. рис. 3).

Контроль макроструктуры и ликвационной неоднородности на металле концевых дисков не выявил каких либо отклонений. Все изделия, изготовленные из слитков с захоложенной верхней частью, соответствовали предъявляемым требованиям. Сопоставление уровня механических свойств металла промышленных поковок, изготовленных из опытных – с захоложенной верхней частью, и обычных – прибыльных слитков для однотипной поковки представлено в табл. 7, 8. Сравнивались усредненные значения по данным испытаний нескольких поковок.

Анализ представленных в табл. 7 данных показывает, что прочностные характеристики металла и величины относительных удлинений опытных и сравнительных слитков находятся на одном уровне. Значения коэффициента неравномерности распределения уровня механических свойств по концам поковок, изготовленных из слитков с захоложенной верхней частью, в 1,4 – 4,7 раз меньше, чем в поковках из слитков традиционной формы. Это связано с более равномерным распределением ликвирующих примесей по длине поковок, изготовленных из слитков с захоложенной верхней частью. Повышенная химическая однородность изделий из слитков, отлитых с использованием надставок-холодильников, обусловлена их ускоренной кристаллизацией. Для однородной по химическому составу поковки проще подобрать температурный режим окончательной термической обработки, так как отпадает необходимость проведения дифференцированной термообработки.

Анализ представленных в табл. 8 данных показывает, что прочностные характеристики металла и значения относительного удлинения опытных и сравнительных слитков находятся на одном уровне. Значения коэффициента неравномерности механических свойств по концам поковок, изготовленных из слитков с захоло-

Таблица 7

Механические свойства по концам полых поковок, полученных из опытного и сравнительного слитков

Тип поковки	Количество поковок, шт	σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	Излом	KCU, кДж/м ²	НВ	Макроструктура
Трубная поковка (опытные)	15	653	745	20,3	74,3	В	246	236	Г
Трубная поковка (сравнительные)	10	637	728	19,7	73,4	В	239	222	Г
Абсолютное изменение механических свойств		16	17	0,6	0,9		7	13,5	
То же, % к сравнительным		2,5	2,3	3	1,2		2,8	5,7	
Поковка типа кокиль (опытные)	2	430	629	18,0	44,0	В	241	216	Г
Поковка типа кокиль (сравнительные)	7	415	634	17,9	43,2	В	233	211	Г
Абсолютное изменение механических свойств		15	–5	0,1	0,8		8	5	
То же, % к сравнительным		3,4	–0,7	0,6	1,8		3,3	2,3	

Таблица 8

Сравнение коэффициента неравномерности механических свойств по противоположным концам поковок из опытных и традиционных слитков

Механические свойства		σ_t , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, кДж/м ²
Слиток с надставкой-холодильником	Разница между максимальным и минимальным значениями	2,3	5,3	2,2	6,5	14
	Коэффициент неравномерности механических свойств, %	4,8	3,3	11,4	9,6	5,7
Слиток с утепляющей надставкой	Разница между максимальным и минимальным значениями	129	117,5	4,5	9,2	26,9
	Коэффициент неравномерности механических свойств, %	19,1	15,3	23,4	13,6	11
Кратность уменьшения разброса механических свойств, раз		4	4,7	2	1,4	1,9

женной верхней частью, в 1,4 – 4,7 раз меньше, чем в поковках из слитков традиционной формы.

Это свидетельствует о повышении качества полых поковок, полученных из слитков с захоложенной верхней частью, что делает их производство более технологичным и экономически целесообразным.

Выводы. Изменение теплофизических условий кристаллизации кузнечных слитков за счет применения захлаживающих прибыльных надставок обеспечивает преимущественное продвижение фронта затвердевания в горизонтальном направлении и ускорение темпа кристаллизации в головной части слитка.

Сравнение слитков, отлитых с различным утеплением головной части показало, что слитки с ускоренной кристаллизацией головной части обладают повышенной структурной и химической однородностью, а также рациональной формой и оптимальным расположением усадочной раковины, что позволяет при производстве полых изделий полностью удалить ее в отходы.

Исследование качества металла полых поковок, полученных из обычного прибыльного слитка и слитка с захоложенной верхней частью массой 13,56 и 12,14 т показало существенное возрастание равномерности

распределения механических свойств по объему поковок из опытных слитков, что обусловлено подавлением ликвационных процессов и повышением однородности химического состава в исходном слитке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жульев С.И., Зюбан Н.А. Производство и проблемы качества кузнечного слитка. – ВолгоГТУ: РПК «Политехник», 2003. – 168 с.
2. Дурынин, В.А., Солнцев Ю.П. Исследование и совершенствование технологии производства с целью повышения ресурса стальных изделий из крупных поковок ответственного назначения. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2006. – 272 с.
3. Дуб В.С., Дуб А.В. // Электрометаллургия. 2006. № 11. С. 18–22.
4. Жульев С.И. Оптимизация процессов производства кузнечных слитков для поковок ответственного назначения с использованием САПР-технологий: Дисс. ... докт. техн. наук. – Волгоград, 1991. – 372 с.
5. Скобло С.Я., Казачков Е.А. Слитки для крупных поковок. – М.: Металлургия, 1973. – 248 с.
6. Шамрей В.А., Жульев С.И. // Металлург. 2007. № 11. С. 49 – 54.

© 2012 г. Д.В. Руцкий, Н.А. Зюбан,
А.Н. Галкин, С.Б. Гаманюк
Поступила 23 апреля 2012 г.