ISSN 0026–0827

МЕТАЛЛУРГ

6 • 2013

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

ПОЗДРАВЛЯЕМ ТРУДЯЩИХСЯ ОТРАСЛИ
С ПРОФЕССИОНАЛЬНЫМ ПРАЗДНИКОМ
ДНЕМ МЕТАЛЛУРГА – 21 ИЮЛЯ!

УДК 621.746.5

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ РАЗЛИВКИ СТАЛИ В СЛИТКИ

© **Дуб Владимир Семенович**, д-р техн. наук, проф.;
Ромашкин Александр Николаевич, канд. техн. наук; **Мальгинов Антон Николаевич**
ОАО НПО «ЦНИИТМАШ». Россия, Москва. E-mail: an_romashkin@cniitmash.ru

Статья поступила 24.01.2013 г.

Рассмотрены перспективные технологические приемы, применяемые при разливке качественной стали в слитки. Рассмотрены такие вопросы, как многоковшовая разливка, оптимизация геометрии слитков, оптимизация химического состава разливаемого металла, освоение производства полых слитков, вакуумирование в струе, особенности сифонной разливки крупных слитков, материалы для утепления прибыльной надставки слитков, защита от вторичного окисления и скоростной режим разливки. Даны рекомендации по совершенствованию применяемых на российских предприятиях технологических режимов разливки стали в слитки.

Ключевые слова: разливка; крупный кузнечный слиток; вакуумирование; дегазация; изложница.

Развитие энергетического, тяжелого и транспортного машиностроения и повышение массогабаритных характеристик моноблочных деталей требуют освоения производства поковок массой до 400–500 т, получаемых из слитков массой до 600 т из высокочистых сталей, часто сложной композиции.

Важным технологическим этапом, определяющим характеристики качества таких слитков, является технология разливки. Она должна обеспечивать сохранение и, по возможности, повышение достигнутой на предыдущих этапах передела степени чистоты расплава металла. При этом несмотря на существенно ограниченные возможности рафинирования металла в процессе разливки, применение определенных технологических и конструктивных решений на этом этапе может быть весьма эффективным и способно в значимой степени повысить характеристики качества готовой металлопродукции.

Разработка технологии производства самых крупных кузнечных слитков (см. таблицу), производимых в нашей стране, всегда происходила с участием сотрудников лаборатории крупного слитка ОАО НПО «ЦНИИТМАШ». Благодаря этому в ЦНИИТМАШе был накоплен и систематизирован уникальный производственный опыт, на основании которого в данной работе осуществлен анализ тенденций развития технологии производства слитков в России и мире и даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию данного технологического процесса.

Многоковшовая разливка. Один из повсеместно применяемых при разливке крупных слитков технологических приемов – так называемая многоковшовая разливка. Такой прием обязателен при получении слитков, масса которых превышает единичную максимальную вместимость имеющихся на предприятии разливочных ковшей. При подобном способе разливки в состав цехового оборудования целесообразно включить

Хронология отливки крупнейших отечественных слитков

Год	Масса слитка, т	Геометрические характеристики			Изготовитель
		H/D	конусность, %	прибыль, %	
1952	80	1,8	3,50	19,8	УЗТМ, НКМЗ
1953	Полый слиток 25	2,5*	2,0	25,0	УЗТМ
1955	Полый слиток 60	2,5*	3,0	25,0	«Баррикады»
1972	235	1,6	14,7	22,8	Ижорский завод (ИЗ)
1973	142	1,0	16,0	25,4	ИЗ
1981	290	1,0	13,5	26,2	ИЗ
1984	360	1,3	13,6	21,2	ИЗ
1992	420	1,2	14,1	24,0	ИЗ
–	520	1,2	14,0	22,0	Проект

* Отношение высоты тела слитка к средней толщине стенки.

поворотный стенд с промежуточным ковшом (ПК), причем стенд желательно также оснастить подъемным механизмом для обеспечения возможности крепления системы защиты металла от вторичного окисления при переливе из разливочного ковша в ПК. Наличие подобного стенда позволяет значительно упростить логистику подачи ковшей, сделать технологию разливки более гибкой.

Кроме того, при такой схеме разливки для уменьшения химической неоднородности слитков последовательность подачи ковшей целесообразно увязывать с содержанием углерода в металле. Первыми на разливку следует направлять ковши с металлом с высоким содержанием этих элементов, а последующие – с пониженным. Как показала практика, содержание углерода в металле первого ковша целесообразно назначать в пределах 1,1–1,6 среднезаданного содержания углерода в слитке. В последнем ковше оно должно быть в пределах 0,4–0,9 среднезаданного.

Однако дифференциация только содержания углерода не позволяет повысить однородность химического состава слитков, что связано с изменением плотности расплава стали при изменении содержания в ней углерода. Поэтому для обеспечения желаемого эффекта уменьшение содержания углерода должно быть отчасти компенсировано увеличением содержания другого, более тяжелого элемента, например, молибдена. Было предложено изменение содержания этого элемента определять в каждой порции металла как разность со среднезаданным и как зависимость от аналогичной разности содержания углерода в данном ковше по следующей формуле:

$$\Delta[\mathrm{Mo}] = (1{,}3\text{–}1{,}5)\Delta[\mathrm{C}], \qquad (1)$$

где $\Delta[\mathrm{Mo}]$ и $\Delta[\mathrm{C}]$ – изменение содержания молибдена и углерода, %.

Подобное изменение содержания легирующих по ковшам позволяет наиболее эффективно изменять состав той части слитка, которая формируется в начале затвердевания, а именно в период заливки первого ковша, когда расплав в изложнице наименее загрязнен ликватами, и состав первых порций твердого металла близок к составу заливаемого. Толщина слоя δ (мм) закристаллизовавшегося металла (при продолжительности опорожнения 150-т ковша примерно 20 мин) может быть определена по закону квадратного корня

$$\delta = k\tau^{0,5}, \qquad (2)$$

где k – коэффициент затвердевания стали в изложнице, мм/мин^{0,5}; τ – продолжительность затвердевания, мин.

Учитывая, что в изложнице k составляет в среднем 22–25 мм/мин^{0,5} (принимаем максимальное его значение, поскольку требуется оценить затвердевание первых порций металла, когда скорость роста твердой фазы максимальна), получим, что толщина твердого слоя, формируемого в процессе заливки одного ковша, может составить около 110 мм. При диаметре слитка 2,0–4,0 м это лишь 5–10% радиуса. Однако даже подобный эффект является положительным и способствует стабилизации химического состава металла слитка, а значит, увеличивает однородность свойств, поэтому его применение можно считать целесообразным.

Оптимизация геометрии слитков. Изменение геометрии слитков позволяет эффективно управлять параметрами их химической, физической и структурной неоднородности. Однако ввиду взаимопротивоположного влияния изменения геометрии слитка на эти характеристики оптимизация конфигурации слитков является достаточно сложной проблемой и требует проработки в каждом конкретном случае. Так, например, для изделий типа «вал» требуются слитки, в которых гарантированно исключена зона осевой рыхлости, поэтому такие слитки должны иметь значение H/D, близкое к единице, или увеличенную конусность. В слитках, предназначенных для полых изделий (обечайки, трубы, кольца и т.п.), допускают наличие зоны осевой рыхлости определенных размеров, поэтому с целью обеспечения их большей химической однородности такие слитки более рационально делать с бóльшим значением отношения H/D и меньшей конусностью.

Изменение геометрии слитков часто используют с целью обеспечения попадания в заданный химический состав. Последнее объясняется тем, что основной ликвирующий элемент – углерод

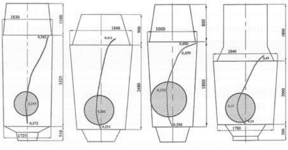

Рис. 1. **Пример распределения углерода по высоте осевой части слитков (экспериментальные данные); окружности – уменьшение содержания углерода в придонной части слитка, обусловливающее снижение прочности металла в этой части слитка [данные ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»]**

Рис. 2. **Влияние H/D слитка на особенности осевого распределения углерода (расчетные данные)**

– в значительной мере определяет прочностные свойства металла, поэтому в придонной области, обедненной этим элементом (рис. 1), прочность металла при аналогичном режиме термообработки часто бывает пониженной. Это может стать причиной отбраковки заготовки.

Поэтому, оптимизируя геометрические размеры слитка (рис. 2) и тем самым, обеспечивая заданный диапазон колебаний содержания углерода и, соответственно, требуемые свойства, можно увеличить воспроизводимость необходимых свойств, в том числе заданных в суженных пределах. Анализ подобных графиков позволяет выявить оптимальную геометрию слитка, при которой обеспечивается заданный диапазон разброса содержания элементов.

Определение точной геометрии слитка, при которой обеспечивается минимальная химическая неоднородность при допустимой физической неоднородности, может быть проведено, в частности, в программе «Крупный слиток» [1]. Пример получаемых с помощью этой программы зависимостей, на основании которых была оптимизирована геометрия слитков, представлен на рис. 3.

Наличие подобной информации позволяет точнее и более воспроизводимо обеспечивать заданные значения характеристик качества слитков.

Разработка оптимальной геометрии слитка также может быть проведена с использованием методов холодного моделирования.

Так, в лаборатории крупного слитка ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» оптимизацию геометрии слитков проводят методом холодного моделирования с применением тепловизионных средств контроля температуры [2] (рис. 4). На этом рисунке отображена динамика затвердевания слитка из гипосульфита натрия. Как видно, результаты измерения температуры с помощью

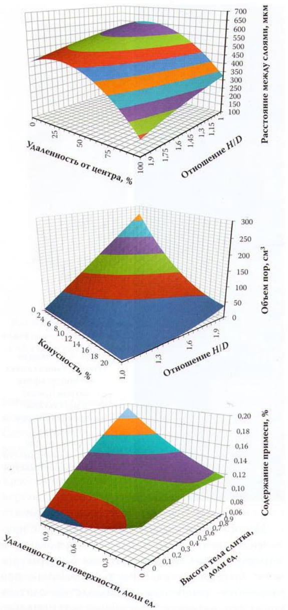

Рис. 3. **Влияние геометрии слитка из стали 10ГН2МФА массой 65 т на характеристики его структурной, физической и химической неоднородностей**

тепловизора (Flir SC640) позволяют отчетливо отследить расположение теплового центра слитка. Аналогичным образом было исследовано влияние способа заливки (сифоном и сверху) на распределение температуры по слитку, в том числе на положение теплового центра в слитке. В настоящее время сотрудники лаборатории проводят эксперименты по изучению влияния геометрии слитка и способов заливки на особенности его тепловой работы.

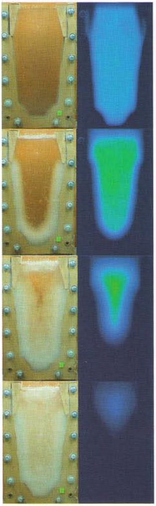

Рис. 4. **Динамика затвердевания слитка из гипосульфита натрия (слева) и результаты тепловизионного измерения температуры фасадной поверхности разливочной оснастки (справа)**

Подобные исследования, проводимые с применением методов холодного моделирования и тепловизионных средств контроля температуры, могут быть рекомендованы к применению при разработке технологии производства слитков новых типоразмеров. Получаемые с их помощью данные позволят повысить точность результатов компьютерного моделирования благодаря более подробному анализу тепловой работы слитка и, соответственно, снизить затраты на освоение новых технологических режимов.

В иностранных компаниях применение тепловизионных средств контроля для оптимизации металлургических технологий находит широкое применение в промышленных масштабах [3].

Оптимизация химического состава разливаемого металла. Одним из методов совершенствования технологии разливки с целью повышения химической однородности кузнечных слитков и соответственно свойств металлопродукции является оптимизация химического состава разливаемого металла: максимальное уменьшение содержания ликвирующих примесей и минимизация в рамках заданных пределов содержания легирующих элементов, затрудняющих затвердевание и, тем самым, способствующих развитию ликвационных процессов. Основными ликватами, как известно, являются углерод, сера и фосфор. Содержание последних двух должно быть минимальным; содержание углерода следует обеспечивать близким к нижнему заданному пределу.

Минимизация концентрации ликвирующих примесей, в том числе серы, обусловлена необходимостью обеспечения заданной степени химической однородности и уменьшения возможности развития грубой зональной макросегрегации. Подобная взаимосвязь требований обусловлена объективными особенностями протекающих при затвердевании процессов и, в частности, с перераспределением примесей при фазовом переходе. Последнее получает наиболее полное развитие при замедлении темпов затвердевания, что, в свою очередь, происходит при увеличении массы (площади сечения наиболее узкой части) затвердевающего объекта. Именно поэтому при производстве сверхкрупных слитков обеспечивают минимальное экономически целесообразное содержание ликватов.

Так, при производстве сверхкрупного слитка, предназначенного для изготовления сплошного цельнокованого ротора, японские производители снизили содержание серы в разливаемом металле до 5 ppm [4]. При таких содержаниях вероятность возникновения шнуров внецентровой ликвации существенно меньше. Столь низкое содержание серы обусловливает повышенную флокеночувствительность металла, поэтому увеличение массы слитков, сопровождающееся уменьшением содержанием серы, требует дальнейшего снижения содержания водорода. Подробнее речь о методах снижения содержания водорода пойдет ниже в разделе «Вакуумирование в струе».

Основным элементом, затрудняющим затвердевание сплава, является кремний [5–9]. Это хорошо видно при сравнении значений коэффициентов аккомодации кремния и железа. Этот коэффициент, предложенный Чалмерсом [10] и рассчитываемый по выражению (3), отражает особенности элемента и его поведение при кристаллизации

$$A_i = \exp\{-Q_{\text{пл}}/(RT_{\text{пл}})\}, \qquad (3)$$

где A_i –коэффициент аккомодации i-того элемента; $Q_{\text{пл}}$ – теплота плавления компонента,

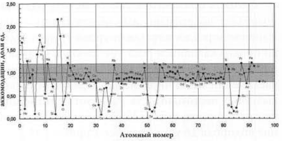

Рис. 5. **Значения относительного коэффициента аккомодации (относительно железа) для элементов Периодической системы**

Дж/атом; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); $T_{пл}$ – температура плавления компонента, К.

В общем случае элемент B тем больше затрудняет кристаллизацию расплава, чем значительнее его коэффициент аккомодации отличается от коэффициента аккомодации матричного элемента C:

$$\Delta A = |\Delta A^C - \Delta A^B|, \tag{4}$$

где A^C, A^B – коэффициенты аккомодации элементов основы и примеси соответственно.

Результаты расчета значения ΔA для различных элементов приведены на рис. 5. Как видно, из традиционно присутствующих в составе стали элементов в наибольшей мере с железом несовместимы углерод, сера, кислород, а также кремний. Поэтому уменьшение содержания этого элемента в стали будет способствовать ускорению ее затвердевания и повышению химической однородности [5–9].

При этом следует иметь в виду, что кремний в большинстве случаев является чисто технологическим элементом, необходимым для обеспечения требуемой степени раскисленности стали, и потому этот раскислитель вполне может быть заменен другими, менее отрицательно влияющими на затвердевание, – алюминием и/или кальцием.

Эффективность уменьшения концентрации кремния наглядно иллюстрируют фото на рис. 6 и графики на рис. 7. Последний слиток, несмотря на свою большую массу, благодаря меньшему содержанию кремния имеет значительно меньшую химическую неоднородность и пораженность шнурами.

Аналогичные рассуждения могут быть приведены и в отношении марганца. На сегодня содержание этого элемента в марках стали, где он не является легирующим, составляет 0,2–0,5%. Такие значения были регламентированы в конце прошлого века исходя из необходимости нивелирования

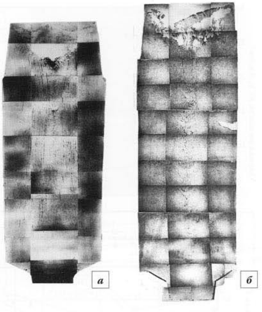

Рис. 6. **Фото серных отпечатков с продольных темплетов слитков массой 80 (*а*) и 123,1 т (*б*) из стали типа 25Х2НМФА с обычным (0,3%) и низким (0,09%) содержанием кремния соответственно**

негативного влияния серы, среднее содержание которой в то время составляло около 0,02–0,03%. Сегодня концентрация этой примеси даже в стали рядовых марок значительно меньше; в стали качественных марок обычно содержится 0,005% серы. Кроме того, стали таких марок повсеместно подвергают обработке кальцием, обладающим существенно бóльшим, чем марганец, сродством к сере и потому замещающим его в составе сульфидов. Наконец, в стали некоторых марок марганец является нежелательной примесью. Например, присутствие марганца в стали для роторов увеличивает ее склонность к отпускной хрупкости при длительных термических воздействиях, а в стали для атомных реакторов марганец способствует охрупчиванию при радиационном воздействии [11]. Поэтому наличие таких количеств марганца в составе стали ряда марок является нерациональным, так как помимо завышения стоимости металлопродукции и снижения ее эксплуатационных характеристик это приводит к увеличению химической неоднородности и соответственно повышенной дисперсии всего комплекса свойств стали.

Таким образом, оптимизация химического состава разливаемой стали заключается в уменьшении содержания серы и фосфора, обеспечении содержания углерода, близкого к нижнему заданному пределу, минимизации содержания

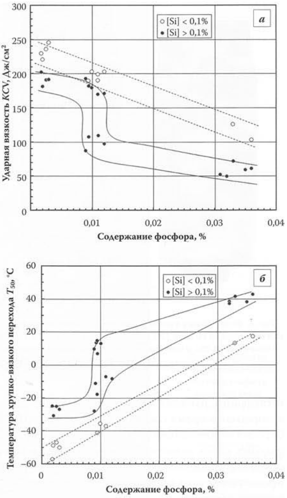

Рис. 7. **Зависимость ударной вязкости (*а*) и температуры хрупко-вязкого перехода (*б*) от содержания фосфора в бескремнистой и раскисленной кремнием стали**

кремния и уменьшении содержания марганца. Подобная оптимизация композиции позволит также повысить химическую однородность металла и уменьшить дисперсию свойств металлопродукции.

Интенсификация дегазации при разливке в вакууме. Метод разливки в вакууме применяют преимущественно для крупных слитков. Он позволяет рафинировать металл, прежде всего от водорода, и исключить возможность вторичного окисления металлического расплава кислородом атмосферы. Метод имеет явно выраженное преимущество перед другими способами вакуумирования, заключающееся в отсутствии ферростатического давления, что, в свою очередь, обусловливает более благоприятные условия для дегазации.

Сегодня применение такого метода разливки позволяет воспроизводимо обеспечивать содержание водорода в металле на уровне 1 ppm. Однако продолжающийся рост требований к характеристикам качества металла при одновременном увеличении единичной массы изделий (слитков) вызывает необходимость разработки технологических приемов, позволяющих снизить содержание водорода до уровня менее 1 ppm.

Одним из способов достижения этого является вдувание в струю разливаемого в вакууме металла инертного газа через полый стопор или пористые вставки в шиберной заслонке. Подобный технологический прием был реализован японской компанией JSW [12]. Для слитков массой 200 т осуществляли продувку расплава аргоном через стопор в промежуточном ковше, что приводило к снижению среднего содержания водорода на 24% (величина [H] была уменьшена с 0,75 до 0,57 ppm). Изменение среднего содержания водорода в металле, выплавляемом в компании JSW по традиционной и описываемой технологиям, показано на рис. 8.

Помимо этого эффективность струйной дегазации может быть повышена благодаря ее неоднократному повторению. Такой технологический прием применяют на другом японском предприятии JCFC. Там струйное вакуумирование металла производят при переливе из одного ковша в другой в вакууме. Метод обеспечивает удаление водорода на 0,28 ppm (значение [H] было уменьшено с 1,43 до 1,15 ppm) [13]. Принципиальная схема такого технологического приема и изменение среднего содержания водорода в металле, выплавляемом на JCFC, представлены на рис. 9.

Изучением возможности вдувания аргона в струю разливаемого металла занимались и отечественные ученые, в частности С.И. Жульев и Н.А. Зюбан [14], однако до промышленного внедрения разработки доведены не были.

В лаборатории крупного слитка ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» была проработана возможность применения метода вдувания аргона в струю металла в процессе разливки при производстве крупных слитков [15]. При этом метод был усовершенствован путем назначения интенсивности продувки в зависимости от окисленности разливаемого металла. Это позволяет увеличить степень и эффективность дегазации металла при разливке. Было выявлено также, что расход инертного газа (аргона), подаваемого в струю металла при переливе из разливочного ковша в промежуточный, следует определять по выражению

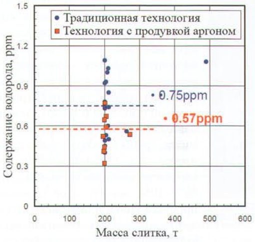

Рис. 8. **Изменение содержания водорода в металле до и после применения интенсификации дегазации [12]**

$$V_{Ar} = (a_{min}...a_{max}) - (b_{min}...b_{max})\lg a_0, \qquad (5)$$

где V_{Ar} – расход аргона, л/мин; a_0 – активность кислорода в металлическом расплаве, измеренная перед выездом ковша со стенда внепечной обработки на разливку, ppm; a и b – коэффициенты.

Известен отечественный патент [16] на установку для разливки стали, сочетающую в себе преимущества двух описанных выше технологических приемов (рис. 10). В соответствии с данным изобретением сталеразливочный ковш *1* со сталью стыкуют с вакуум-камерой *2*, сливной патрубок *3* которой входит в полость ПК *4*. После открывания шиберного затвора *5* ковша *1* металл заполняет нижнюю часть ПК *4* и патрубок *3*. В вакуум-камере *2* создают разряжение. Металл, вытекающий из ковша, проходит через шлюзовую камеру *6* и вакуум-камеру *2*, где струя и слой металла на днище подвергаются вакуумной дегазации. После разливки 85–95% плавки закрывают затвор *5* сталеразливочного ковша, отсекают от вакуум-провода *7* полость шлюзовой камеры *6*, закрывают вакуумный затвор *8*, заполняют шлюзовую камеру атмосферным воздухом, расстыковывают вакуум-камеру и порожний ковш, заменяют его новым, после чего шлюзовую камеру соединяют с вакуум-проводом, открывают ее затвор и процесс повторяют до полной разливки заданного количества плавок.

Отказ от применения промежуточных ковшей при вакуумной разливке слитков. При рассмотрении перспективных технологических приемов, применяемых при вакуумной разливке в слитки высококачественной стали, следует от-

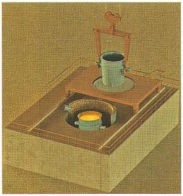

Рис. 9. **Применяемая компанией JCFC установка для струйного вакуумирования и изменение содержания водорода в металле до и после применения метода перелива [13]**

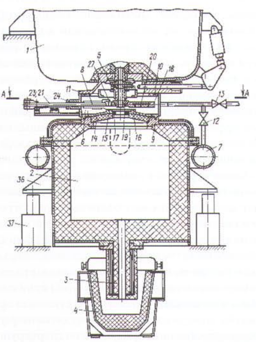

Рис. 10. **Схема установки для разливки в вакууме с вакуумплотным промежуточным ковшом [16]**

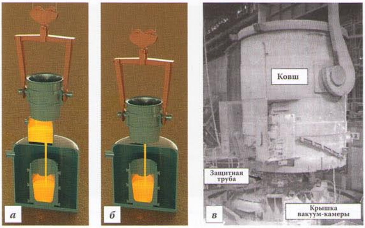

Рис. 11. **Схема разливки стали в слитки с промежуточными ковшом (*а*) и без него (*б*) и установка для разливки в вакууме без промежуточного ковша (*в*)**

метить последнее достижение компании JSW – исключение из технологической цепочки ПК (рис. 11). Подобный прием позволяет снизить загрязненность металла экзогенными включениями, формирующимися в результате размытия огнеупорного слоя ПК, уменьшить возможность вторичного окисления металла и повысить общую эффективность производства крупных слитков благодаря сокращению временн**ы**х затрат и снижению расхода огнеупоров.

Таким образом, в последние годы метод вакуумной разливки был значительно модифицирован с целью обеспечения более высоких потребительских или технологических свойств металла. Однако эти изменения практически не коснулись отечественных машиностроительных заводов. Такая ситуация, во-первых, обеспечивает конкурентное преимущество иностранным производителям, а во-вторых, лишает отечественные предприятия возможности выхода на сегмент рынка высококачественной продукции из сверхкрупных слитков необходимой высокой чистоты, в том числе по водороду.

Освоение производства полых слитков. В настоящее время мировые производители оборудования для машиностроения все больше внимания уделяют освоению производства полых слитков для изготовления полых осесимметричных изделий (рис. 12) [3, 17–21]. Для производства таких изделий, как обечайки, трубы и кольца, такие слитки имеют ряд общепризнанных преимуществ: уменьшение массы слитка на 5–10%; значительное упрощение процесса ковки в результате исключения нескольких технологических этапов (рис. 13); уменьшение расхода топлива [22].

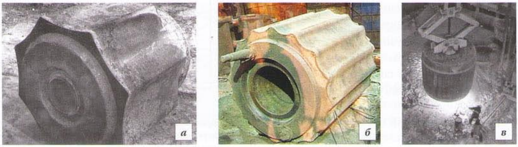

Рис. 12. **Полые кузнечные слитки различных производителей:**
а – 25 т, УЗТМ, 1956 г.; *б* – 57 т, Vitkovice, 2011 г. [3]; *в* – 160 т, Sheffield Forgemasters, 2010 [17, 18]

Рис. 13. **Сравнение технологии производства обечайки из сплошного и полого слитков**

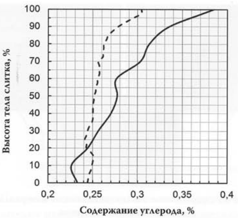

Рис. 14. **Сравнение распределения углерода в полом слитке из стали 25Х2НМФА массой 126 т (- - - -; результаты расчета) и в сплошном массой 142 т (——; экспериментальные данные [5])**

Меньший поперечный размер затвердевающего сечения, характерный для полых слитков, обусловливает меньшую продолжительность их затвердевания и, соответственно, более дисперсную и однородную структуру и химический состав (рис. 14). Следствием этого, в свою очередь, является повышение стабильности свойств поковки и меньшее значение требуемой степени укова, обеспечивающей заданные значения механических свойств.

Обеспечение большей химической однородности и, соответственно, свойств особенно актуально для наиболее крупных слитков, где ввиду их значительной массы процессы ликвации получают наибольшее развитие. Известны случаи, когда свойства металла в нижней части крупных обечаек, соответствующей зоне отрицательной ликвации в слитке, не соответствовали заданным значениям (при их изготовлении из сплошных слитков). Причиной этого была именно химическая неоднородность исходных слитков (см. рис. 1). При этом в верхней части этих обечаек ввиду значительно большего содержания углерода прочностные свойства превышали минимальные значения почти на 100%. Конечно, подобный разброс свойств сам по себе уже недопустим, поэтому освоение производства полых слитков, отличающихся большей химической однородностью (см. рис. 14), для изготовления подобных деталей является актуальной для отечественного машиностроения задачей.

Однако производство полых слитков связано с рядом технологических трудностей, среди которых большая сложность организации направленности затвердевания в вертикальном направлении; необходимость организации симметричности затвердевания в горизонтальном направлении; необходимость обеспечения свободного удаления стержня при раздевании слитка и др. Стоимость экспериментальной разработки и отработки технологических приемов, обеспечивающих выполнение перечисленных условий, сопоставима с эффектом от внедрения производства полых слитков для мелкосерийного производства, поэтому разработку столь сложной технологии целесообразно проводить с использованием компьютерного моделирования. Это было сделано в ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» с использованием описанного в работе [1] метода. Были рассмотрены варианты производства полых слитков литьем: в песчано-глинистую форму с керамическим стержнем, в изложницу с керамическим стержнем, в изложницу с металлическим стержнем и в изложницу с усовершенствованным металлическим стержнем [23]. Анализ химической, структурной и физической неоднородности слитков, полученных по каждому из технологических вариантов, позволил найти оптимальное решение. Были составлены технологические рекомендации производства полых слитков.

Следует отметить, что в качестве прототипа полых слитков могут быть рассмотрены слитки с захоложенной верхней частью, усадочная раковина которых проникает глубоко в тело слитка, но при этом ее поперечный размер после термодеформационной обработки не превышает диаметр удаляемой в отход осевой части – «выдры» [21, 24, 25]. Подобные слитки также характеризуются большей химической однородностью ввиду более высокой скорости затвердевания и некоторым упрощением технологического процесса, поэтому в некоторых случаях их применение является вполне целесообразным.

Сифонная разливка крупных слитков. В настоящее время на заводах, производящих металлургические заготовки для энергетического и тяжелого машиностроения, увеличивают как долю в общей номенклатуре производства, так и единичную массу кузнечных слитков, разливаемых сифонным методом. В частности, такой метод применяют при разливке слитка массой 170 т на чешском машиностроительном предприятии Pilsen Steel [26]. Причем на данном предприятии разливку ведут из нескольких ковшей без ПК с прерыванием струи.

Распространение метода сифонной разливки объясняется рядом очевидных причин. Во-первых, современный уровень развития технологии внепечной обработки позволяет воспроизводимо обеспечивать низкое содержание водорода, при этом необходимость в вакуумной разливке отпадает. Во-вторых, при сифонной разливке есть возможность менее затратного (чем разливка в вакууме) и при этом достаточного надежного способа защиты струи металла от вторичного окисления. В-третьих, такой метод разливки позволяет стабилизировать содержание азота в готовом металле (актуально для сталей, легированных азотом). В-четвертых, благодаря уменьшению разбрызгивания при поступлении первых порций металла разливка сифонным методом позволяет обеспечить более качественную поверхность слитков. И наконец, в-пятых, современные огнеупорные материалы позволяют практически исключить загрязнение металла экзогенными включениями из сифонных каналов, что дает возможность устранить один из существенных недостатков этого метода.

Материалы для утепления прибыльной надставки слитков. В настоящее время в мире уже произошла повсеместная замена конусных прибыльных надставок, футеруемых шамотным кирпичом, цилиндрическими надставками, утепляемыми современными материалами блочного типа (рис. 15). Эти материалы обладают большей теплоизоляционной способностью, и потому их применение способствует улучшению тепловой работы прибыли и уменьшению ее объема.

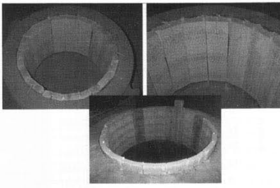

Рис. 15. **Современные теплоизоляционные материалы для прибыльных надставок**

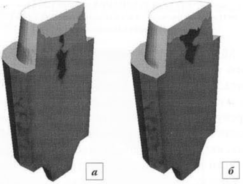

Рис. 16. **Результаты моделирования затвердевания слитка массой 65 т с прибыльной надставкой, утепленной шамотом (*а*) и теплоизоляционным «одеялом» из поликристаллического волокна (*б*) (темные участки – с пониженной плотностью металла)**

Кроме того, сейчас на рынке теплоизоляционных материалов появился новый материал – теплоизоляционные «одеяла» из поликристаллического волокна. Коэффициент теплопроводности таких материалов при 800 °С не превышает 0,2 и 0,4 Вт/(м·К) при 1600 °С. К таким материалам относятся: LYJX-715 (Китай; λ = 0,20 Вт/(м·К) при 1000 °С), Fibermax (Франция, λ = 0,18 Вт/(м·К) при 800 °С), В-ГШВ (Украина, λ = 0,30 Вт/(м·К) при 800°С). Применение подобных материалов позволяет значимо уменьшить массу прибыльной части слитков и, соответственно, снизить их стоимость.

На рис. 16 приведены результаты компьютерного моделирования затвердевания слитков массой 55 т из стали 15Х2НМФА с прибыльной надставкой, зафутерованной традиционными материалами (слой шамотного легковесного кирпича и слой обычного) и теплоизоляционным «одеялом» из поликристаллического волокна. В слитке с прибыльной частью, зафутерованной шамотом (см. рис. 16, *а*), значительная масса металла в прибыли затвердела на стенках надставки; этот металл не участвовал в подпитке тела слитка расплавом, а лишь выполнял роль теплового барьера. В слитке же с прибыльной частью, зафутерованной теплоизоляционным «одеялом», подобные настыли отсутствуют (см. рис. 16, *б*), поэтому практически весь металл участвовал в подпитке тела слитка в процессе затвердевания, что в итоге привело к образованию существенно меньшей усадочной раковины. Последнее при прочих равных условиях дает возможность уменьшить массу прибыльной части слитка и тем самым снизить его стоимость. Таким образом, применение современных высокоэффективных теплоизоляционных материалов позволяет увеличивать долю годной части слитков и тем самым снижать себестоимость выпускаемой продукции.

Защита разливаемой стали от вторичного окисления. Следующим важным вопросом технологии разливки является необходимость обеспечения защиты от вторичного окисления.

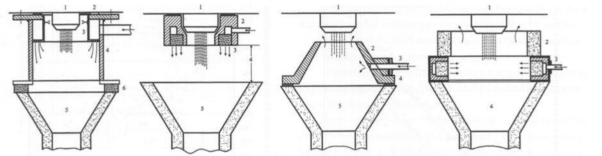

Рис. 17. **Типы устройств, применяемых для защиты металла от вторичного окисления при разливке**

Сегодня этот вопрос является критичным, поскольку именно на этапе перелива металлического расплава из ковша в изложницу возможно наиболее сильное снижение чистоты металла и, соответственно, ухудшение качества конечного изделия. Подвергать металл рафинированию после разливки практически невозможно, поэтому развитие процесса вторичного окисления должно быть минимизировано. Этого достигают применением специальных устройств, исключающих возможность контакта металлического расплава с кислородом воздуха. Примеры подобных приспособлений приведены на рис. 17. Широкое применение такие устройства получили в черной металлургии, в том числе при производстве стали рядовых марок. Однако в машиностроении, где производят наиболее ответственные изделия, подобные технические решения практически не распространены. Отчасти это связано с неудобством применения решений, используемых в массовом производстве штучных изделий.

Между тем отсутствие подобных систем на отечественных машиностроительных предприятиях обусловливает повышенную вероятность возникновения в заготовках дефектов, в том числе браковочных, и повышение дисперсии свойств готовой металлопродукции.

В качестве примера может быть приведен случай, когда на одном из отечественных заводов пытались освоить производство стали новой перспективной марки, характеризуемой низким содержанием раскислителей, требуемым высоким уровнем раскисленности и низкой загрязненностью неметаллическими включениями. Разливку стали производили переливом открытой струей из разливочного ковша в ПК и далее в изложницу в вакуум-камере. Увеличение содержания кислорода при таком способе разливки достигало десятикратного значения. Все полученные по такой технологии заготовки оказались бракованными. Надлежащую степень чистоты удалось обеспечить только при использовании специального защитного устройства открытой струи.

Таким образом, наличие системы защиты от вторичного окисления является необходимым условием освоения производства современных высокочистых марок стали. Поэтому отсутствие на отечественных заводах практики использования защиты от вторичного окисления обеспечивает иностранным производителям очередное конкурентное преимущество в виде большей стабильности свойств и меньшей себестоимости, достигаемой, в частности, за счет уменьшения доли брака.

Скорость разливки стали тесно связана с такой характеристикой качества стальных слитков, как количество продольных поверхностных трещин. Такие трещины возникают на слитках в результате разрыва только что сформировавшейся корочки под действием столба металлического расплава при неоптимальном сочетании скорости роста твердой корочки и скорости наполнения изложницы (изменения ферростатического давления). Следовательно, для уменьшения количества трещин на слитках или предупреждения их появления необходимо повысить прочностные свойства корочки слитка в первые моменты ее кристаллизации и обеспечить условия равномерного роста корочки слитка – без воздействия на нее интенсивных конвективных потоков жидкого металла.

Практика показала, что разливка 8–16-гранных слитков со скоростью 0,2–0,4 м/мин позволяет предотвратить образование продольных трещин. При этом увеличение числа граней позволяет сдвинуть оптимальную скорость разливки в область более высоких значений. Также скорость разливки может быть увеличена благодаря уменьшению кинетической энергии струи, достигаемому в результате дробления струи на несколько более мелких. Возможность применения

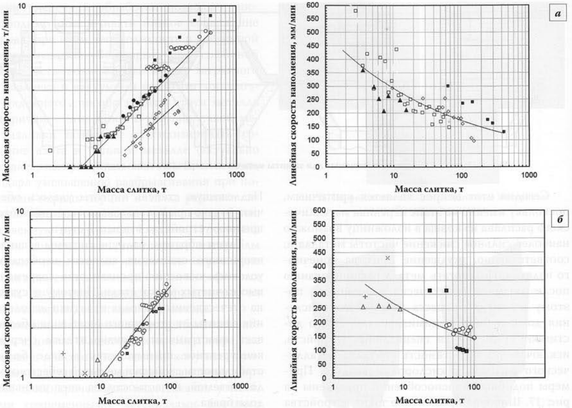

Рис. 18. Зависимость массовой и линейной скоростей разливки от массы слитка по данным различных машиностроительных заводов для случаев разливки стали сверху (*а*) и сифоном (*б*): ○ – завод А; ● – завод Б (ПАО «НКМЗ») [28, с. 154, 197,]; □ – завод В; ■ – завод Г; ▲ – завод Д; Δ – завод Е; ♦ – завод Ж (Витковице); × – завод З (ОАО «Камасталь») [29]; + – завод И (Ellwood Quality Steel Company) [30]; ◊ – завод «Баррикады» [14]

такого технологического приема была исследована в работе [27]. Обобщенные данные о зависимости массовой и линейной скоростей разливки от массы слитков, при которых не образуются продольные трещины, по данным отечественных и зарубежных машиностроительных заводов приведены на рис. 18.

В соответствии с приведенными данными массовая скорость разливки слитков различной массы, при которой на них не образуются продольные трещины, может быть примерно рассчитана по уравнениям (6) и (7) для случаев разливки сверху и сифоном соответственно; линейная скорость может быть рассчитана по уравнениям (8) и (9):

$$v_{\text{мас}}^{\text{сверху}} = 0{,}5\sqrt{M}; \qquad (6)$$

$$v_{\text{мас}}^{\text{сифон}} = 0{,}3\sqrt{M}; \qquad (7)$$

$$v_{\text{лин}}^{\text{сверху}} = 470M^{-0{,}2}; \qquad (8)$$

$$v_{\text{лин}}^{\text{сифон}} = 420M^{-0{,}2} \qquad (9)$$

где $v_{\text{лин/мас}}$ – линейная и массовая скорости наполнения изложницы, мм/мин и т/мин; M – масса слитка, т.

Из рис. 18, *а* видно, что зависимость (6) не соответствует данным завода «Баррикады». Это связано с тем, что скорость разливки слитков на этом заводе регламентировали исходя не только из необходимости исключения возможности образования продольных поверхностных трещин на слитках, но и с целью достижения максимальной дегазации при переливе расплава из ПК в изложницу в вакуум-камере. Проведенные на данном заводе исследования [14] показали, что с возрастанием массовой скорости разливки эффективность дегазации снижается (рис. 19), поэтому массовая скорость разливки слитков, применяемая на заводе «Баррикады», несколько занижена относительно общепринятых значений.

Следует отметить, что, несмотря на заниженные значения массовой скорости, зависимость линейной скорости наполнения изложниц от массы получаемых слитков на заводе «Баррикады» вполне соответствует общей тенденции (см. рис. 18, *а*). По-видимому, это связано с бóльшими

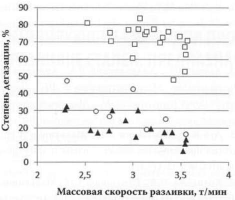

Рис. 19. **Влияние скорости разливки на степень удаления кислорода (□), водорода (○) и азота (▲) при вакуумной разливке [14]; (сталь 38ХН3МФА; $[O]_{исх}$ = 0,008–0,016 %; $[H]_{исх}$ = 0,0005–0,0007 %; $[N]_{исх}$ = 0,006–0,008 %; p = 0,7–1,2 кПа)**

значениями H/D отливаемых на данном заводе слитков.

Сопоставление данных о массовой и линейной скоростях разливки показывает меньший разброс значений первой в зависимости от массы слитка; изменение линейной скорости разливки в зависимости от массы слитка менее единообразно для различных предприятий, что, очевидно, говорит об отсутствии общепризнанной единой методики расчета значения оптимальной линейной скорости наполнения изложницы.

Сравнение абсолютных значений массовой и линейной скоростей разливки для случаев разливки сверху и сифоном также показывает, что в последнем случае она несколько меньше. Это, по-видимому, обусловлено возможностью поднятия расплавом верхней части центрового стока при больших скоростях разливки.

Заключение. Обзор технологических приемов, применяемых при разливке стали в слитки, показал, что для обеспечения характеристик качества слитков, удовлетворяющих современным требованиям машиностроения, технологический процесс должен включать в себя следующие этапы:

– дифференциацию содержания углерода по ковшам при многоковшовой разливке;

– интенсификацию дегазации при разливке благодаря введению аргона в струю разливаемого металла;

– оптимизацию состава разливаемого металла;

– исключение промежуточного ковша при разливке слитков, масса которых не превышает массу металла в ковше;

– освоение производства полых слитков для изготовления полых осесимметричных изделий;

– оптимизацию геометрии слитков для изделий определенной номенклатуры;

– обязательное применение системы защиты струи металла при переливе из разливочного ковша в промежуточный ковш.

При этом для повышения стабильности свойств металлоизделий разливку слитков, предназначенных для их изготовления, следует производить из заданного для изделий определенного типа стандартного состояния, характеризуемого содержанием газов, активностью кислорода в металлическом расплаве, общим химическим составом и температурой.

Библиографический список

1. **Дуб А.В., Дурынин В.А., Ромашкин А.Н. и др.** Метод разработки технологии производства кузнечных слитков // Тяжелое машиностроение. 2012. № 7. С. 21–33.

2. **Ромашкин А.Н., Толстых Д.Н., Мальгинов А.Н. и др.** Применение средств тепловизионного контроля для холодного моделирования процессов разливки: Сб. тезисов Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы разливки и кристаллизации стали, сварки, термообработки и математическое моделирование технологических процессов» (Москва. 13–14.12.2012). М. : ЦНИИТМАШ, 2012. С. 12.

3. **Machovcaka P., Oplera A., Tkadleckovab M.** The utilization of numerical modeling to optimize the production of heavy forging ingots in Vítkovice Heavy Machinery A.S.: 1st Int. Conf. on Ingot Casting, Rolling and Forging. (Brüssel-Saal. 6 June, 2012). P. 1–8.

4. **Yasuto I., Koji M., Tomohiro M.** Recent technological process on large ingots for rotor forgings: Int. Forgemasters Meeting'2011. P. 166–169.

5. **Дуб В.С.** Исследование внецентренной ликвации и разработка методов подавления ее развития в крупных слитках. Дис. ... д-ра техн. наук. М. : ЦНИИТМАШ, 1980. Т. 1. 395 с.

6. **Ребрик А.А.** Исследование внецентренной химической неоднородности и разработка методов определения ее расположения в крупных слитках. Дис. ... канд. техн. наук. М. : ЦНИИТМАШ, 1981. 210 с.

7. **Макаров И.И.** Исследование влияния параметров прибыли на кинетику затвердевания стали и формирование усадочных дефектов в крупных слитках. Дис. ... канд. техн. наук. М. : ЦНИИТМАШ, 1976. 175 с.

8. **Дуб А.В., Дуб В.С., Макарычева Е.В. и др.** Факторы управления процессами затвердевания // Электрометаллургия, 2006. № 11. С. 18–22.

9. **Дуб А.В.** Физико-химические основы управления процессами и управление процессами формирования пер-

вичной структуры и комплексом служебных свойств низколегированных сталей. М. : МИСиС, 2000. 375 с.

10. **Чалмерс Б.** Теория затвердевания. М. : Металлургия, 1968. 157 с.

11. **Stofanak R.J., Poskie T.J., Li Y.Y. et al.** Irradiation Damage behavior of low alloy steel wrought and weld materials. Westinghouse Electric Corporation. Beitis Laboratory. West Mifflin, PA 15122.

12. **Takashi U., Tadashi S., Sou U. et al.** Dehydronation in large ingot casting process: Int. Forgemasters Meeting'2009.

13. **Yasuji T., Hiroshi Y., Haruhiko, Naruse et al.** Advanced ladle to ladle stream degassing method in JCFC: Int. Forgemasters Meeting'2009.

14. **Жульев С.И., Зюбан Н.А.** Производство и проблемы качества кузнечного слитка. Волгоград : ВолгТУ, 2003. 168 с.

15. **Пат. 2406768 РФ, МПК C21C7/00.** Способ дегазации стали / Ромашкин А.Н., Макарычева Е.В., Дуб А.В. и др.; заявл. 29.05.2009, опубл. 20.12.2010.

16. **Пат. 2082543 РФ, МПК[8] B22D11/10.** Способ вакуумирования металла в процессе разливки и устройство для его осуществления /Афонин С.З., Паршин В.М., Ларин А.В. и др.; заявл. 07.02.1994; опубл. 27.06.1997.

17. **Tomlison M., Talamantes-Silva J., Davies P.** The Development of Hollow Ingot Technology at Sheffield Forgemasters Int. Ltd: Int. Forgemasters Meeting'2011. P. 175–178.

18. Forgemasters trials hollow ingot casting. World Nuclear News. 25/11/2010. Режим доступа: http:\\www.world-nuclear-news.org

19. **Giradin G., Jobard D., Perdriset F. at al.** Hollow ingots: thirty years of use to control segregation and quality for nuclear and petrochemical large shells: Int. Forgemasters Meeting'2011. P. 170–174.

20. **Sang-Hun Oh, Jung Namkung, Seog-Ou at al.** A study on the fabrication of a large hollow ingot by CAE: Int. Forgemasters Meeting'2011. P. 179–182.

21. **Kolodkin M.V., Zhul'ev S.I., Dub V.S. et al.** Choice of a Rational Scheme for Casting of a Forging Ingot for Producing Hollow Forgings // Russian Metallurgy (Metally). 2010. Vol. 2010, No. 6. P. 544–547.

22. **Акаро И.Л., Андриевский Р.А., Аржанов А.Ф. и др.** Энциклопедия. Машиностроение. Т. III-2 Технологии заготовительных производств. М. : Машиностроение, 1996. 736 с.

23. **Дуб В.С., Ромашкин А.Н., Мальгинов А.Н. и др.** Технология производства полых слитков // Электрометаллургия. 2013. № 2. С. 17–37.

24. **Колодкин М.В., Ромашкин А.Н., Мальгинов А.Н.** Разработка специальной технологии отливки слитка для повышения технико-экономических показателей производства полых поковок // Тяжелое машиностроение. 2010. № 6. С. 24–29.

25. **Колодкин М.В., Жульев С.И., Дуб В.С., Ромашкин А.Н.** Выбор рациональной схемы отливки кузнечного слитка для производства полых поковок // Электрометаллургия. 2009. № 8. С. 26–26.

26. **Novak M.** Production aspects and materials evaluation of the forged nuclear cask from 170 tons bottom poured ingot: Int. Forgemasters Meeting'2009.

27. **Солодовников В.Д.** Совершенствование технологии выплавки, вакуумирования и разливки стали для валков холодной прокатки. Дис. ... канд. техн. наук. М. : ЦНИИТМАШ. 169 с.

28. **Смирнов А.Н., Макуров С.Л., Сафонов В.М. и др.** Крупный слиток. Донецк : Вебер, 2009. 278 с.

29. **Штеклейн В.А, Шаманов А.Н, Коврижных А.В.** Улучшение качества стали при сифонной разливке в ОАО «МЗ "Камасталь"» // Сталь. 2008. № 11. С. 50–52.

30. **Zhang, L., Rietow B., Thomas B.G. et al.** Large Inclusions in Plain-carbon steel ingots cast by bottom teeming // ISIJ Int. 2006. Vol. 46, No. 5. P. 670–679.

MAIN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR STEEL CASTING INTO INGOTS

© **Doub V.S.**, Dr Sc. (Eng.), prof.; **Romashkin A.N.**, Cand. Sc. (Eng.); **Malginov A.N.**

The perspective technology of forging ingots casting is described. Discussed issues such as multipouring casting, optimization of ingots geometry, chemical composition optimization, mastering of hollow ingots production, casting in vacuum, bottom casting of large ingots, materials for the hottop insulation, protection secondary oxidation. Technological recommendations have been developed.

Keywords: casting; large forging ingot; evacuation; degassing; mold.