



В общемировом производстве стали лишь около 10 % ее разливают в слитки. Однако качество стального слитка, особенно крупного кузнечного массой в сотни тонн, зачастую определяет стратегию конструирования, например, АЭС и ТЭС. В 2012 г. в Германии после многолетнего перерыва проведен Всемирный конгресс по проблеме производства стального слитка, а публикацией данного обзора приглашаем читателей нашего журнала к широкому обсуждению этой проблемы.

УДК 669.117.56

КАЧЕСТВО КРУПНОТОННАЖНЫХ СЛИТКОВ, ОТЛИВАЕМЫХ В ИЗЛОЖНИЦЕ (Аналитический обзор)

В. А. Шаповалов, К. А. Цыкуленко

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, г. Киев, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Рассмотрены современные способы производства в изложнице крупных и сверхкрупных кузнечных заготовок, высококачественных крупнотоннажных слитков. Отмечены основные производители крупнотоннажных поковок. Описаны сложности, возникающие при получении крупнотоннажных слитков. Указаны основные дефекты в слитке, возникающие при использовании того или иного способа. Поскольку качество металла слитка связано прежде всего с глубиной металлической ванны, рассмотрены способы воздействия на глубину металлической ванны и сам процесс кристаллизации слитка. Описаны различные способы улучшения однородности крупных слитков, получаемых в изложнице (последовательная и порционная заливка, различные способы подпитки слитка, ввод макро- и микрохолодильников, инокуляторов). Показано, что процесс порционной электрошлаковой отливки наиболее предпочтителен для снижения химической и структурной неоднородности слитка. Главное преимущество ПЭШО перед другими способами отливки слитков в изложнице заключается в существенном уменьшении объема одновременно кристаллизующегося металла. Дальнейшее совершенствование ПЭШО или подобных ему процессов должно основываться на таких способах производства крупнотоннажных слитков, которые удачно сочетают применение жидкой стали и направленное формирование слитков при контролируемых условиях затвердевания металла. Библиогр. 37, табл. 1, ил. 5.

***Ключевые слова:** кузнечные заготовки; крупнотоннажные слитки; способы получения; дефекты; глубина и форма металлической ванны; химическая неоднородность; структурная неоднородность; направленная кристаллизация; порционная электрошлаковая отливка*

В связи с увеличением габаритов изделий для традиционной и атомной энергетики, металлургического и нефтехимического машиностроения, а также военно-промышленного комплекса, растут потребности в крупных и сверхкрупных кузнечных заготовках, высококачественных крупнотоннажных слитках.

Крупнотоннажным слитком принято считать слиток массой 16 т и более [1], используемый для получения крупных кузнечных поковок. В настоящее время масса кузнечных поковок, а также слитков, из которых они изготавливаются, может составлять многие сотни тонн. Так, например, основные производители слитков в Японии и Корее осваивают производство сверхкрупных поковок из слитков массой до 650 т [2]. На мировом рынке зафиксирован спрос на крупнотоннажные поковки, получаемые из слитков массой 100...200 т, а также на уникальные поковки из слитков 300 и 400 т [3].

Основными производителями крупнотоннажных поковок являются машиностроительные предприятия (таблица), имеющие собственные сталеплавильные мощности, как правило, дуговые печи садкой 100...140 т. С учетом возрастающих требований к качеству крупнотоннажных слитков ответственного назначения при их производстве все большее внимание стали уделять переплавному процессам, в частности ЭШП. Оборудование для электрошлаковой выплавки крупнотоннажных слитков имеется во многих странах, например, установки ЭШП садкой 60 т в России на ООО «ОМЗ-Спецсталь». Американские компании могут переплавлять металл в установках ЭШП садкой до 80 т. (в свое время сообщалось о разработанном компанией «Conсарс» проекте 300-тонной печи ЭШП). Японская компания «Japan Steel Works» успешно использует 100-тонную печь ЭШП [4], а компания «Saarschmiede» (Германия) производит слитки ЭШП массой до 165 т. Китай строит печь ЭШП вместимостью до 250 т [5].


Характеристика производственных мощностей основных машиностроительных предприятий, производящих крупногабаритные поковки в 2009 и 2013 гг.

Фирма	Страна	Максимальная масса слитка, т		Усилие пресса, тыс. т		Объем производства, тыс. т	Оборот, млн евро
		2009	2013	2009	2013		
JSW	Япония	600	650	14×2	14×2	н.д./80	170
«Kobe Steel»	»	520	—	13	13	150/86	270
JCFC	»	510	600	10,5	13	105/54	146
«Sheffield FM»	Англия	340	500	10	15	120/70	118
«Saarschmiede»	Германия	200	—	8,67	8,87	68/40	85
«Areva»	Франция	250	—	11,3	11,3	180/30	355
«Doosan»	Южная Корея	540	630	13	17	200/100	—
«Hyundai»	»	—	—	10	10	—	—
«Taewoong»	»	—	—	15	15	—	—
«Pyosan»	»	—	—	9	9	—	—
«Pilsen Steel»	Чехия	220	—	10	10	80/30	65
CFHI	Китай	330	580	12,5; 15	12,5; 15	180/75	260
CSHI	»	400	—	14	18	190/72	260
SHMP	»	143	—	15,6	15,6	80/20	190
«Harbin Boiler»	»	—	—	8	—	—	—
«Shangai (SEC)»	»	—	600	15	15	—	—
«China Erzhong Dogfang»	»	—	600	12,7	12,7	—	—
L&T	Индия	—	600	—	15	—	—
BHEL	»	—	—	—	—	—	—
«Bharat Forge»	»	—	—	—	14	—	—
ОМЗ-СС	Россия	350	—	13	13	—	—
ВМЗ КО	»	140	—	13	13	—	—
ЭМСС	Украина	130	500*	15	15	102/58	147

* Данные работы [6].

Отметим, что в настоящее время существуют многочисленные способы отливки слитков в изложнице (однократная и порционная отливка, различные виды подпитки), переплавные процессы (электронно-лучевой, вакуумно-дуговой и электрошлаковый переплавы), а также различные виды укрупнения слитка (электрошлаковая сварка, электрошлаковая наплавка, укрупнение и др.) [7]. Каждому из этих способов присущи свои недостатки и ограничения. Выбор того или иного способа определяется прежде всего требованиями к качеству слитка.

Качество слитка характеризуется наличием определенного количества специфических, присущих конкретному способу производства, дефектов. При этом оно находится в прямой зависимости от массы — с увеличением поперечного сечения и массы слитка резко ухудшается качество готовой стали. Неметаллические включения могут снижать предел текучести, в то время как сегрегация элементов может влиять на все физические свойства. Для обеспечения соответствующих свойств и особенно равномерной структуры по всему поперечному сечению в последующих переделах приходится использовать только часть слитка, что снижает выход годного. Однако и эта пригодная часть с удовлетворительными свойствами уменьшается по мере увеличения размера слитка (рис. 1). Поэтому все существующие и вновь разрабатываемые способы получения крупнотоннажных слитков направлены на повышение химической и структурной однородности слитка, увеличение выхода годного.

Одним из первых и до сих пор наиболее распространенным способом получения слитков является их отлив-

ка в изложнице. Поэтому изучение процесса формирования дефектов, присущих этому способу, имеет значение не только само по себе, но и для понимания многих проблем, характерных другим способам.

Существуют две группы дефектов в слитках, отличающихся в изложнице: поверхностные (плены, завороты, трещины) и внутренние (различного рода макро- и микронеоднородности). Если причиной появления дефектов первой группы являются преимущественно условия разливки стали, то определяющими для дефектов второй группы — условия кристаллизации металла в изложнице.

В работах [1, 9, 10] показана роль различных технологических параметров и гидродинамических факторов, определяющих образование поверхностных дефектов в обычном слитке при заполнении изложницы жидкой сталью. Одними из наиболее важных параметров, влияющих на качество поверхности слитков, являются тем-

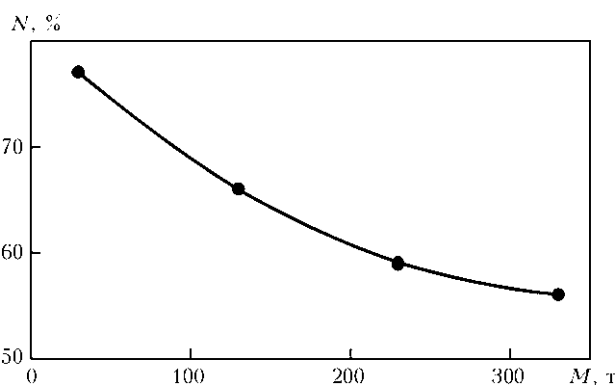


Рис. 1. Зависимость выхода годного N от массы M обычного слитка [8]



пература и скорость разливки стали. Производство этих главных параметров определяет количество тепла, поступающего в изложницу за счет перегрева стали. Наименьшее количество поверхностных дефектов получается при оптимальном (для данной марки стали, а также массы и формы слитка) количестве этого тепла. С увеличением температуры и скорости разливки, а значит, и количества вносимого в изложницу тепла, возрастает вероятность образования трещин. При уменьшении количества вносимого в изложницу тепла ниже оптимального на поверхности слитка образуются различные пленки и завороты.

Наиболее управляемый параметр — скорость разливки, уменьшение которой должно компенсироваться соответствующим повышением температуры разливки. С учетом ограничения возможного перегрева стали основным параметром увеличения количества вносимого струей тепла с увеличением размера слитка является скорость разливки. Скорость при разливке слитков сверху регулируют изменением диаметра отверстия стаканчика разливочного устройства и поддерживают на уровне, позволяющем обеспечить равномерный подъем металла в изложнице без брызг, заплесков и бурления у стенок.

Отметим, что существенное влияние на процесс образования плен оказывает характер истечения струи из промежуточного устройства. С увеличением турбулентности струи количество плен на слитке увеличивается. Турбулентность струи зависит от формы и размеров разливочного стакана, а также организации движения металла в промежуточном устройстве. Отсутствие достаточного уровня металла в промежуточном устройстве, его малая вместимость и интенсивная циркуляция металла приводят к резкому нарушению организации струи. В результате отмечаются разбрызгивание металла и образование на стенках изложницы заплесков, приводящих к заворотам и пленам.

Большое значение в процессе разливки стали имеют процессы вторичного окисления струи кислородом воздуха. Если не применяются специальные средства для предотвращения контакта струи с воздухом, то для уменьшения окисления стали в процессе разливки необходимо установить минимальное расстояние между ковшом и промежуточным устройством, а также уменьшить разбрызгивание и искажение струи, вытекающей из промежуточного устройства в изложницу.

Основные сложности при получении крупнотоннажных слитков вызваны процессами, протекающими при кристаллизации стали. Независимо от технологии выплавки стали и ее обработки вне печи, а также при разливке процесс кристаллизации слитка (конечный этап подготовки стали для последующей горячей деформации) происходит в изложнице. Характером затвердевания жидкого металла в изложнице в основном и определяются главные недостатки, присущие обычному металлургическому слитку: осевая пористость вследствие развития усадочных явлений и значительная химическая неоднородность по высоте и сечению слитка обусловлены ликвацией элементов.

С увеличением объема металла, одновременно кристаллизующегося в изложнице, усиливаются усадочные и ликвационные процессы. Увеличение размеров слитка способствует возрастанию времени его затвердевания,

а, следовательно, и длительности выдержки слитков в изложнице, поскольку транспортировка не полностью затвердевших слитков может привести к ухудшению их макроструктуры. В то же время чрезмерно большая длительность выдержки слитков в изложнице также нежелательна из-за опасности образования трещин.

Кристаллизация жидкого металла слитков происходит одновременно во всем объеме. При этом тепло отводится как через боковые стенки изложницы, так и через поддон, а также излучением, что обуславливает горизонтальную и вертикальную составляющие направленности кристаллизации. Соотношение скоростей горизонтальной и вертикальной кристаллизации и одновременное развитие ликвационных и усадочных явлений способствуют возникновению характерных видов неоднородности — внецентренной или Λ -образной, осевой или V-образной ликвации, а также специфическому зональному строению слитка.

Направленность, в которой завершается затвердевание слитка, определяется отношением высоты слитка к его диаметру H/D . Этот параметр определяет соотношение скоростей горизонтального и вертикального затвердевания. При критическом соотношении горизонтальное и вертикальное затвердевание достигают середины верха слитка одновременно. При $(H/D) < (H/D)_{кр}$ процесс завершается затвердеванием в вертикальном направлении; при $(H/D) > (H/D)_{кр}$ — в горизонтальном. Степень направленности затвердевания слитка связана с преобладанием одной формы кристаллизации над другой [1]. В наиболее распространенных промышленных слитках укороченного типа преимущественное значение приобретает объемная кристаллизация, обуславливающая ускоренное вертикальное затвердевание осевой зоны слитка. В удлиненных слитках преимущественное развитие получает последовательная кристаллизация, вследствие чего затвердевание верхней части их осевой зоны завершается в горизонтальном направлении на вертикальной оси.

Наибольшее распространение получили крупнотоннажные слитки со значением H/D в пределах 1,5...2,5 и конусностью от 2 до 5 %. Слитки этой (обычной) конфигурации отливают массой до 100...150 т. Особенностью слитков с увеличенной до 10...13 % конусностью является резкое уменьшение осевой V-образной неоднородности и повышение плотности, по сравнению со слитками обычной конфигурации равной массы. Эта особенность сохраняется и в слитках массой более 100 т. Увеличение диаметра слитка, вызываемое как увеличением конусности, так и уменьшением значения H/D в пределах 1,5...2,5 не оказывает заметного влияния на интенсивность внеосевой Λ -образной неоднородности. Крупнотоннажные слитки могут иметь пониженное значение отношения H/D или такое же, как и слитки обычной конфигурации.

Особым видом дефектов, всегда присутствующих в стальном слитке, можно считать и неметаллические включения, состоящие в основном из оксидов, сульфидов и нитридов. Зарождение и рост неметаллических включений начинаются еще в жидком расплаве и продолжают при кристаллизации и охлаждении стали. Размеры и распределение образующихся в литой стали



неметаллических включений в основном определяются теплофизическими условиями ее кристаллизации. Многочисленные исследования обычных стальных слитков показали, что включения в них распределяются крайне неравномерно [9]. Места их повышенной концентрации — это ликвационные зоны слитков. Кроме того, средняя загрязненность стали возрастает от периферии к центру слитка и от подприбыльной части к донной. Например, если в поверхностных зонах обычного слитка с дисперсной равноосной структурой размер включений (без учета экзогенных) не превышает 1...3 мкм, то в центральных объемах с грубой равноосной структурой он увеличивается до 25...50 мкм и более.

Загрязненность стали неметаллическими включениями повышается с увеличением массы слитка. Так, в УкрНИИспецстали установлено, что даже небольшое увеличение массы слитка шарикоподшипниковой стали от 2,7 до 4,5 т приводит к повышению среднего балла по глобулярным включениям от 1,53 до 1,87. При этом возрастает количество плавок с предельной оценкой по оксиду от 5,9 до 100, а по глобулям — от 7,6 до 93,8 % [6].

Для улучшения качества крупнотоннажного слитка предпринимают различные технологические приемы. Так, для рафинирования металла от неметаллических включений применяют вакуумную обработку и продувку расплава инертными газами, электромагнитное перемешивание [7, 10], для повышения однородности структуры и удаления крупных неметаллических включений в осевой части слитка — различные способы теплового экранирования изложниц [11] и подпитки [12–16]. С целью воздействия на процесс кристаллизации и подавления ликвационных процессов используют внутренние кристаллизаторы (вкладыши) [17–19] или вводят инокуляторы [20–22].

Исследования различных способов повышения однородности крупных слитков в Витковице [23] способствовали созданию способа отливки слитка в изложнице, объединяющему несколько различных процессов таким образом, чтобы учесть все факторы, оказывающие влияние на чистоту стали. После раскисления в сочетании с двухстадийной вакуумной обработкой следует дуговой обогрев поверхности металла через покрывающий его слой шлака. По истечении определенного времени после заливки жидкий металл в осевой зоне слитка рафинируется путем вливания вакуумированной стали, состав которой подобран таким образом, чтобы был выравнен химический состав металла по всему телу слитка. Эта технология, получившая название VRP (Vitkovice Refining Process), опробована при отливке 50-тонного слитка. Как отмечают авторы процесса, получены хорошее качество и химическая однородность стали, ограничены или подавлены процессы зональной ликвации, а также ликвации в головной и донной частях слитка.

Еще в конце 1950-х гг. в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР проведены исследования нового способа отливки слитков, позволившего бы повысить качество металла слитков, а также резко сократить объем прибыльной части или совсем отказаться от прибыли. Исследования завершились созданием нового способа, названного электрошлаковой подпиткой [24], который заключается в

том, что в ходе кристаллизации головная часть отливается в изложницу слитка подпитывается жидким металлом, образующимся при расплавлении в шлаковой ванне электрода большого сечения. Вместо прибыльной надставки в верхней части изложницы устанавливается шлакоудерживающее кольцо, где после заливки металла в изложницу наводится шлаковая ванна, в которой плавится электрод. С помощью электрошлаковой подпитки можно рафинировать металл в верхней и осевой частях слитка и разбавлять его металлом расходуемого электрода.

Аналогичные способы улучшения качества слитков впоследствии разработали за рубежом применительно к изготовлению крупнотоннажных слитков. Они широко применяются в промышленных масштабах для получения кузнечных слитков примерно с 1970 г. [25–30]. Имеется несколько разновидностей процесса электрошлаковой подпитки крупных слитков.

Процесс БЭСТ (Белер электрослег топтинг) разработан австрийской фирмой «Ферайнигте Эдельштальверке» для производства кузнечных слитков массой до 55 т. Слиток с такой массой соответствует полученному традиционным способом слитку массой 70 т, имеющему прибыльную надставку.

При этом процессе к разлитому по традиционной технологии слитку с помощью расходуемого электрода через находящийся над головной частью слитка жидкий шлак во время кристаллизации подводится энергия. Подводимая мощность, выбираемая в соответствии с требуемой скоростью затвердевания, позволяет существенно влиять на процесс кристаллизации слитка, при котором рабочий шлак находится в водоохлаждаемой металлической надставке. Охлаждаемая надставка может быть многократно использована для производства большого количества слитков. Она позволяет вводить практически неограниченную мощность в течение первого периода затвердевания слитка, благодаря чему действие подпитки распространяется на большую глубину.

Разработчики способа считают, что в этих условиях использование огнеупорного кирпича в качестве футеровки надставки нецелесообразно из-за изменения состава шлака вследствие растворения в нем материала огнеупора.

По сравнению с теплоизолирующим огнеупорным материалом, очевидно, что тепловые потери через водоохлаждаемые стенки надставки выше. Это существенно, но только для первого периода процесса, когда к затвердевающему слитку подводится большое количество тепловой энергии. По мере затвердевания слитка объем жидкой металлической ванны уменьшается, и количество выделяющейся в шлаке энергии должно быть снижено.

Благодаря уменьшению подводимой мощности снижается температура шлака, на стенках надставки увеличивается толщина шлакового гарнисажа, являющегося теплоизолятором. Поэтому несмотря на тепловые потери в течение первого периода процесса использование водоохлаждаемой надставки имеет экономические преимущества [26].

Посредством процесса БЭСТ могут быть получены качественные кузнечные слитки, отличающиеся высокой однородностью. Благодаря отсутствию прибыльной

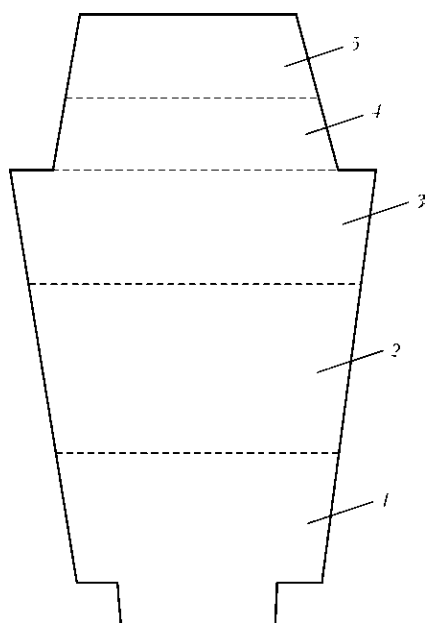


Рис. 2. 400-тонный слиток фирмы «Джапэн стил уоркс» диаметром 3550 мм, изготовленный с использованием процесса AP: 1 — 93 т, 0,30 % С; 2 — 132 т, 0,25 % С; 3 — 100 т, 0,25 % С; 4 — 35 т, 0,25 % С; 5 — 40 т, 0,15 % С

части и подавлению дефектов структуры достигается высокая надежность процесса, выход годного составляет 90 % [26]. С учетом собственных разработок авторы указанной работы полагают, что слитки, полученные с помощью процесса БЭСТ, не ограничены в размерах. Для производства крупных слитков используются многие процессы, однако особое внимание в Западной Европе и в США уделяют процессам ЭШП и БЕСТ [25].

На фирме «Ферайнигте Эдельштальверке» (ФЭВ) с 1970 г. эксплуатируются две промышленные установки для производства слитков БЭСТ. Меньшую установку используют для получения слитков массой до 25 т. Большая установка рассчитана на наибольшую массу 55 т. Уже к началу 1980-х гг. произведено 2700 кузнечных слитков массой до 55 т [28].

Процесс ТРЭСТ (Терни Рифректори Электрослег Топпинг) разработан итальянской фирмой «Терни» для производства кузнечных слитков массой до 62 т [27]. Принципиальным его отличием от процесса БЭСТ является использование футерованной надставки из огнеупорного материала. С его помощью изготавливали 62-тонные слитки с целью получения поковок для роторов высокого давления из хромомолибденованадиевой стали. Эффективность процесса подтверждена испытаниями ротора высокого давления как одного из объектов наиболее сложного в изготовлении с точки зрения образования сегрегаций и неметаллических включений.

Достигнутые положительные результаты явились основанием для создания печи для отливки слитков массой до 100 т [30]. Ведение процесса на такой установке возможно как по одноэлектродной, так и по бифилярной схеме. При подпитке слитков массой до 100 т предпочтение отдается одноэлектродной схеме. Установка работает на постоянном и переменном токах пониженной частоты. Процесс начинается после заливки на жидкую сталь, прошедшую вакуумирование в струе шлака системы $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$.

При создании установки разработаны специальные меры, дающие возможность достигать минимального содержания влаги в газовой атмосфере над ванной жидкого металла, ослабить поглощение водорода шлаком, полностью устранить необходимость ввода раскислителей для поддержания содержания FeO в шлаке на низком уровне. Особое внимание уделено конструкции футерованной надставки с целью ее повторного использования после удаления тонкого слоя футеровки.

Исследования 80-тонного слитка показали отсутствие ликвации в донной части слитка и L-ликвации в его теле. В зоне надставки обнаружен ограниченный участок положительной ликвации.

Процесс Электрослег Хот Топпинг Джапэн разработан в Японии для получения слитков массой до 62 т, в котором также применяют футерованную надставку из огнеупорного материала, однако вместо одного расходного электрода используют три графитовых.

Управление затвердеванием слитка во всех процессах подпитки обеспечивает, по сравнению с полученными по традиционной технологии слитками, повышенную плотность в осевой зоне слитка, существенное уменьшение общей сегрегации и сегрегационных шнуров, а также значительное повышение степени чистоты.

Несмотря на то, что повышение качества металла подтверждено выплавкой тысяч слитков, до настоящего времени, как нам известно, ни один из процессов подпитки не был опробован для выплавки крупных кузнечных слитков массой более 100 т.

Для изготовления сверхкрупных слитков еще в 1972 г. фирмой «Джапэн стил уорк лтд») в Муроране (Япония) предложена технология последовательной заливки. Эта технология под названием процесс AP (after pouring) или MP (multy pouring) применяется в Японии для получения 400...500-тонных слитков. Металл из нескольких печей последовательно заливается в один слиток, причем содержание углерода от плавки к плавке уменьшается.

На рис. 2 показана последовательность разливки плавков стали для таких слитков. Первые четыре плавки разливаются одна за другой до тех пор, пока сталь частично не заполнит утепленную прибыльную надставку. Более высокое содержание углерода в плавках, идущих в нижнюю часть слитка, помогает преодолеть отрицательную сегрегацию, обычно обнаруживаемую в подобных слитках. По истечении 20...24 ч верхушку слитка открывают и осторожно добавляют дополнительно 40 т стали с более низким содержанием углерода, при этом желательно избегать попадания металла в зону кристаллизации слитка. Более низкое содержание углерода в стали дополнительной порции позволяет получать крупнотоннажные слитки с относительно равномерным содержанием углерода по сечению. Вместе с тем степень ликвации остальных элементов, в том числе и вредных (сера, фосфор, кислород), остается все еще довольно высокой (рис. 3). Тем не менее натурные испытания 190-тонных роторов, изготовленных из 400-тонных слитков, показали, что эта неоднородность может удовлетворить самые жесткие технические условия [23]. Японские исследователи считают доказанной экономическую це-

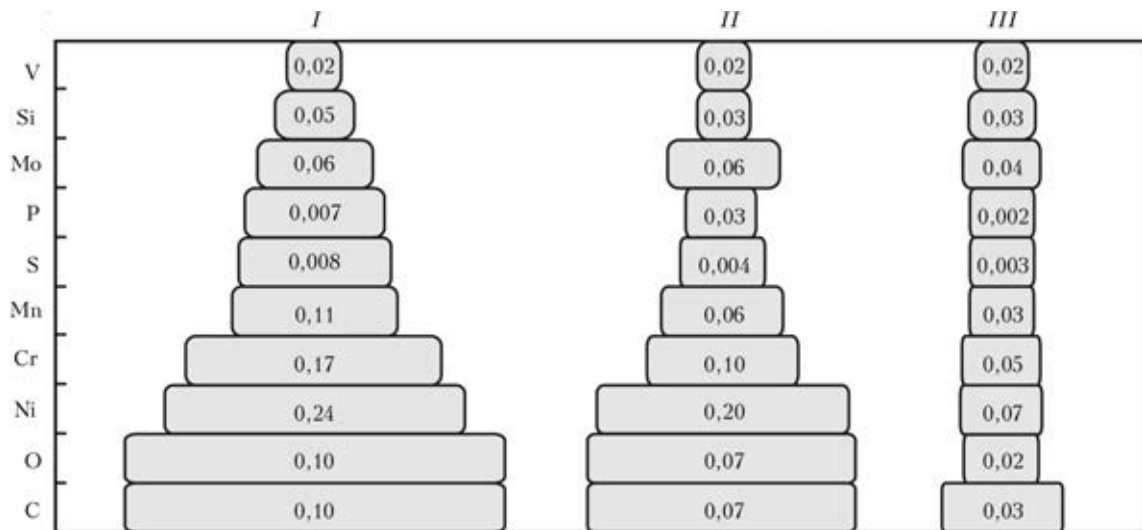


Рис. 3. Средние значения сегрегации элементов в крупных поковках (масса слитков более 70 т) [30], %: I — обычная выплавка; II — способ AP; III — ЭШП

лесообразность производства 500-тонных слитков упомянутым способом.

И все же процесс кристаллизации металла в изложнице не претерпел существенных изменений (по сравнению с традиционным) и поэтому в слитках, отлитых по этому способу, могут обнаруживаться дефекты ликвационного и усадочного происхождения. Кроме того, этот процесс не может обеспечить равномерное распределение неметаллических включений и предотвратить образование крупных, обычно экзогенных, оксидных включений. Вследствие этого некоторые исследователи [31] считают, что процесс последовательной заливки является только временным, хотя и успешным, решением проблемы надежного и воспроизводимого производства крупных слитков с относительно малой сегрегацией по углероду. Как видно из рис. 3, использованием переплавных процессов, в частности ЭШП, можно достичь более высокого качества металла, однако технология подпитки значительно проще и затраты существенно меньше. Кроме того, получение крупнотоннажных слитков классическим способом ЭШП расходуемого электрода связано с определенными ограничениями. В общем, чем больше диаметр такого слитка ЭШП, тем ниже его качество.

Более существенное (по сравнению с различными способами разливки) влияние на процесс кристаллизации металла в изложнице оказывают такие способы, как использование макро- и микрохолодильников (внутренних кристаллизаторов) различного типа. Это могут быть предварительно установленные в изложнице металлические вкладыши [17–19] или различные инокуляторы, вводимые в изложницу одновременно с разливкой стали.

Все эти способы направлены на подавление зональной ликвации, обуславливающей развитие структурной и химической неоднородности, а также на предотвращение дефектов литейного и усадочного происхождения.

Введение в изложницу внутренних кристаллизаторов для повышения качества стального слитка было предложено и реализовано еще в 1950–1960-х гг. [32]. И если на первых порах необходимо было обеспечить обязательное и полное растворение вкладышей в поступающем в изложницу металле, то по мере совершенствования технологий разливки,ковки и прокатки стало до-

пустимым наличие нерастворенной части вкладышей, что в свою очередь позволило использование более массивных вкладышей и интенсификацию процесса затвердевания слитка. Полученные по данной технологии слитки принято называть армированными квазимонолитными (АКМ). Они характеризуются более мелкой усадочной раковинной, а их макроструктура принципиально отличается от структуры обычного слитка [33]. В слитке АКМ нет зоны разориентированных кристаллов и V-образной ликвации, осевой пористости и т. д.

Изменение макроструктуры слитка, армированного нерасплавленным вкладышем, является следствием снятия перегрева, а также существенного изменения условий затвердевания массы жидкого металла, разделенной на отсеки элементами вкладыша (рис. 4). При заливке эти отсеки заполняются жидким металлом, и кристаллизация каждого отсека происходит в условиях направленного теплоотвода в образующие данный отсек пластины — элементы армирующего вкладыша.

К сожалению, в настоящее время такую технологию для получения крупнотоннажных кузнечных отливок массой 100 т и более не используют. Однако ее применяют для получения 20-тонного листового слитка. По-

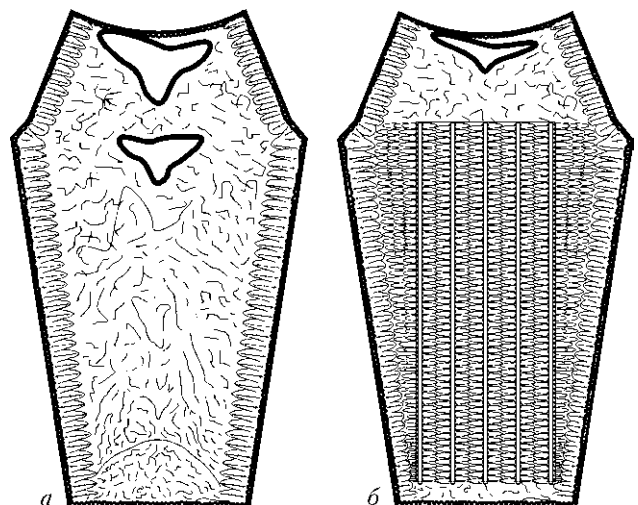


Рис. 4. Схема макроструктуры 20-тонного листового слитка [19]: а — обычный; б — АКМ

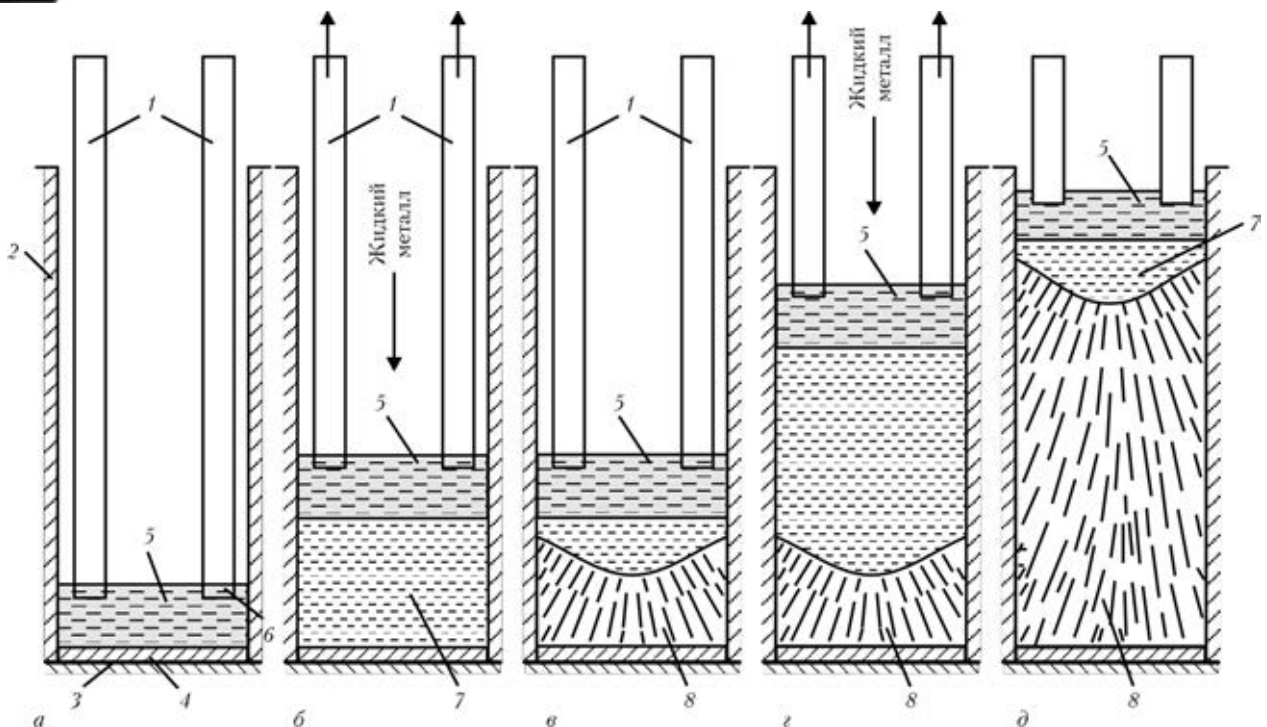


Рис. 5. Схема получения слитка способом ПЭШО [36]: 1 — нерасходуемые электроды; 2 — кристаллизатор; 3 — поддон; 4 — затравка; 5 — шлаковая ванна; 6 — шлаковый гарнизаж; 7 — металлическая ванна; 8 — затвердевший металл; обозначения а–д см. в тексте

видимому, это связано с большой трудоемкостью подготовки и установки армирующего вкладыша, необходимостью применения только сифонного способа заливки. А кроме того, многие производители опасаются возможного расслоения слитка в процессековки. Поэтому при изготовлении крупнотоннажных слитков большее внимание стали уделять технологиям инокулирования при полном растворении вводимых макро- и микрохолодильников [20–22].

Использование технологии разливки стали с применением инокуляторов способствует получению однородной структуры и подавляет развитие ликвационных процессов. Установлено, что введение 1,5...2,5 % твердых частиц при жидко-твердой разливке (имеется в виду ввод инокуляторов в струю разливаемого металла) приводит к увеличению протяженности зоны конуса осаждения в 1,3 раза и в 3 раза уменьшает область, пораженную трещинами [21]. В работе [22] отмечено, что в 24-тонном слитке стали 38ХНЗМФА, отлитом в вакууме с искусственным образованием инокуляторов в струе, распределение механических свойств по объему полученных поковок имеет более равномерный характер из-за расслоения ликвационных шнуров на отдельные составляющие с меньшей концентрацией ликвирующих примесей.

Еще одним способом воздействия на процесс кристаллизации металла в изложнице можно считать разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона способ порционной электрошлаковой отливки (ПЭШО) [34–37]. На рис. 5 представлена схема указанного способа, согласно которой в водоохлаждаемой изложнице с помощью нерасходуемых графитовых электродов наводят шлаковую ванну (рис. 5, а). Затем через слой расплавленного шлака заливают первую порцию стали, полученной в том или ином сталеплавильном агрегате. В процессе заливки металла погруженные в шлак электроды автоматически

поднимаются (рис. 5, б). После заливки первой порции металла ведут электрошлаковый обогрев зеркала металла, обеспечивающий постепенное затвердевание металла снизу вверх так, что к моменту заливки следующей порции металла под слоем шлака остается небольшое количество жидкого металла (рис. 5, в). Заливаемый металл следующей порции смешивается с остатками металла предыдущей порции [34]. Процесс заливки порции металла, выдержка и частичная ее кристаллизация повторяются несколько раз до заполнения всей изложницы (рис. 5, з). После заливки последней порции металла постепенно снижают подводимую к шлаковой ванне мощность для предупреждения образования усадочной раковины в головной части слитка (рис. 5, д).

Основной особенностью этого процесса является не последовательная (как в японском процессе AP), а порционная заливка, где каждая порция обрабатывается отдельно с помощью ЭШП. Здесь, в отличие от всех описанных способов получения крупнотоннажного слитка, его кристаллизация происходит не сразу во всем объеме, а частями. При этом для оценки формирования кристаллической структуры отдельной части слитка справедливо соотношение $(H/D)_{кр}$, где H в данном случае определяется не высотой слитка, а представляет собой сумму значений высоты заливаемой порции металла и глубины металлической ванны к моменту заливки порции. Следовательно, качество металла слитка, полученного способом ПЭШО, может быть сопоставимо с качеством металла, отлитого в изложницу слитка массой, примерно равной массе одной порции. Как правило, масса одной порции соответствует массе металла одной плавки, произведенной в том или ином сталеплавильном агрегате. Для получения одного слитка ПЭШО используют металл 4...6 плавов.

Опыт производства крупнотоннажных слитков с помощью ПЭШО свидетельствует о значительном улучшении качества изделий ответственного назначения



[37]. Дальнейшее совершенствование ПЭШО или подобных ему процессов должно основываться на таких способах производства крупнотоннажных слитков, удачно сочетающих применение жидкой стали и направленное формирование слитков при контролируемых условиях затвердевания металла. Главное преимущество ПЭШО перед другими способами отливки слитков в изложнице заключается в существенном уменьшении объема одновременно кристаллизующегося в изложнице металла. Именно поэтому слитки ПЭШО имеют более высокое качество.

1. *Скобло С. Я., Казачков Е. А.* Слитки для крупных поковок. — М.: Металлургия, 1973. — 248 с.
2. *Отчет* о мировом форуме производителей крупных поковок (Сантандер, Испания, 3–7 нояб., 2008). — Сантандер, 2008. — С. 11–19.
3. <http://www.kagefest.ru/> Первый этап модернизации завода Энергомашспецсталь, 2006.
4. <http://www.jsw.co.jp/en/guide/facilities.html>.
5. <http://www.day.kiev.ua>. Почему ЗаЛК пытаются вернуть в собственность // День. — 2012. — № 91. — С. 30–05.
6. *Ефимов М. В.* Интеграция в глобальные цепочки поставок. Международный форум «АТОМЭКСПО 2011» // www.2011.ato-mexpro.ru.
7. *Электрошлаковый металл* / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1981. — 680 с.
8. *Производство крупных слитков — новая эра ЭШП* / Г. Гинце, Г. Шейдих, А. Чудхури, Р. Яух // Электрошлаковый переплав. — 1973. — Вып. 1. — С. 16–21.
9. *Дефекты стали: Справ. изд.* / Под ред. С. М. Новошеновой, М. И. Виноград. — М.: Металлургия, 1984. — 199 с.
10. *Ефимов В. А.* Разливка и кристаллизация стали. — М.: Металлургия, 1976. — 552 с.
11. *Зиченко В. Г., Пешиков М. О., Роцин В. Е.* Повышение качества кузнечных слитков путем теплового экранирования изложниц // Электрометаллургия. — 2011. — № 6. — С. 41–44.
12. *Белоус Г. С., Дудко Д. А.* Новый способ отливки фасонных изделий и слитков без прибылей с помощью электрошлаковой подпитки // Автомат. сварка. — 1958. — № 8. — С. 32–36.
13. *Махнер П.* Опыт производства крупных кузнечных слитков с помощью процесса БЭСТ и состояние технологии электрошлаковой подпитки // Электрошлаковый переплав. — 1983. — Вып. 6. — С. 306–316.
14. *Базеви С., Скепи М., Репетто Е.* Способ ТРЭСТ для производства валов высокого давления из хромомолибденованадиевой стали // Там же. — 1983. — Вып. 6. — С. 317–322.
15. *Махнер П.* Опыт производства крупных кузнечных слитков с помощью процесса БЭСТ и состояние технологии электрошлаковой подпитки // Там же. — 1983. — Вып. 6. — С. 306–316.
16. *Усовершенствованный процесс БЭСТ — разработка и результаты* / В. Майер, В. Миттер, П. Махнер и др. // Там же. — 1987. — Вып. 9. — С. 159–163.
17. *Новицкий В. К., Макульчик А. В., Блинов В. В.* Исследование слитков с внутренними кристаллизаторами // Кристаллизация металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — С. 112–120.
18. *Оценка влияния внутренних кристаллизаторов на затвердевание и структуру полых слитков из аустенитной стали АКМ* / А. Д. Чепурной, А. В. Литвиненко, Е. А. Казачков и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 4. — С. 27–31.
19. *Многослойная сталь* в сварных конструкциях / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, А. К. Цыкуленко и др. — Киев: Наук. думка, 1984. — 288 с.
20. *Цыкуленко А. К., Жук Н. В., Скрипник В. П.* Исследование влияния кусковых присадочных материалов на структуру и свойства электрошлакового металла // Электрошлаковая технология. — Киев: Наук. думка, 1983. — С. 167–171.
21. *Посламовская Ю. А., Петрова В. Ф.* Влияние технологии разлива стали с использованием индукторов на качество нижней части крупных кузнечных слитков // Технология металлов. — 2011. — № 2. — С. 19–24.
22. *Жульев С. Ш., Шелухина Ю. М., Зюбан Н. А.* Влияние инокулирования на внесевую ликвацию в слитках для крупных поковок // Сталь. — 2008. — № 2. — С. 58–62.
23. *Шмрха Л., Ержабек В., Мотлох З.* Новые пути улучшения внутренней однородности крупных кузнечных слитков // Электрошлаковый переплав. — 1983. — Вып. 7. — С. 36–48.
24. *Белоус Г. С., Дудко Д. А.* Новый способ отливки фасонных изделий и слитков без прибылей с помощью электрошлаковой подпитки // Автомат. сварка. — 1958. — № 8. — С. 32–36.
25. *Поковки* повышенного качества, изготовленные методами ЭШП и БЭСТ / П. Махнер, Т. Кюнелт, Г. Егер и др. // Электрошлаковый переплав. — 1979. — Вып. 5. — С. 259–266.
26. *Махнер П.* Опыт производства крупных кузнечных слитков с помощью процесса БЭСТ и состояние технологии электрошлаковой подпитки // Там же. — 1983. — Вып. 6. — С. 306–316.
27. *Базеви С., Скепи М., Репетто Е.* Способ ТРЭСТ для производства валов высокого давления из хромомолибденованадиевой стали // Там же. — 1983. — Вып. 6. — С. 317–322.
28. *Кюнелт Г., Махнер П.* Специальные способы производства крупных кузнечных слитков // Там же. — 1984. — Вып. 7. — С. 50–61.
29. *Усовершенствованный процесс БЭСТ — разработка и результаты* / В. Майер, В. Миттер, П. Махнер и др. // Там же. — 1987. — Вып. 9. — С. 159–163.
30. *Применение* процесса ТРЭСТ в производстве крупного вала ротора / М. Прианте, А. Олдровани, Э. Репетто, П. Соммовиго // Там же. — 1987. — Вып. 9. — С. 154.
31. *Вальстер М.* Применение ЭШП и изделий, получаемых при помощи этого метода // Там же. — 1974. — Вып. 2. — С. 252–269.
32. *Новицкий В. К., Макульчик А. В., Блинов В. В.* Исследование слитков с внутренними кристаллизаторами // Кристаллизация металлов. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — С. 112–120.
33. *Оценка влияния внутренних кристаллизаторов на затвердевание и структуру полых слитков из аустенитной стали АКМ* / А. Д. Чепурной, А. В. Литвиненко, Е. А. Казачков и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 4. — С. 27–31.
34. *Новый способ* производства крупных кузнечных слитков высокого качества / Ю. В. Латаш, А. Е. Воронин, В. А. Николаев и др. // Там же. — 1975. — Вып. 2. — С. 31–42.
35. *Латаш Ю. В., Воронин А. Е., Николаев В. А.* Производство высококачественных крупных слитков способом порционной электрошлаковой отливки // Сталь. — 1975. — № 11. — С. 999–1002.
36. *Исследование* электрошлаковой отливки крупных слитков / А. Е. Воронин, Ю. В. Латаш, Ф. К. Биктагиров и др. // Спец. электрометаллургия. — 1984. — Вып. 56. — С. 11–15.
37. *Латаш Ю. В., Матях В. Н.* Современные способы производства слитков особо высокого качества. — Киев: Наук. думка, 1987. — 236 с.

The advanced methods of producing the large and superlarge forge ingots, high-quality large-tonnage ingots in the mould are considered. The main manufacturers of large-tonnage forgings are noted. The main difficulties encountered in producing large-tonnage ingots are described. Main defects in ingot, occurring in use of different methods, are indicated. As the quality of ingot metal depends, first of all, on the metal pool depth, the methods of effect on the metal pool depth and the process of ingot solidification itself are considered. Different methods for improvement of homogeneity of large ingots, produced in the mould, are described (successive and portion pouring, different methods of ingot hot-topping, adding of macro-and micro-coolers, inoculators). It is shown that the process of a portion electroslag casting is most preferable to reduce the chemical and structural heterogeneity of the ingot. The main advantage of PESC over the other methods of casting of ingots into the mould consists in a significant decrease in volume of simultaneously solidifying metal. The further improvement of PESC or processes, similar to it, should be based on such methods of producing the large-tonnage ingots which combine successfully the application of molten steel and directed formation of ingots at controllable conditions of metal solidification. Ref.37, Table 1, Figs.5.

Key words: *forge billets; large-tonnage ingots; methods of producing; defects; depth and shape of metal pool; chemical heterogeneity; structural heterogeneity; directed solidification; portion electroslag casting*

Поступила 22.11.2012