



Experimental investigation techniques of thermal condition during hardening and heating of large steel ingots made in industrial conditions with account of specific features of production organization and heating units are worked out. Regularities of hardening and heating of blooming and slab ingots are analyzed.

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, НПО "Платан" (Екатеринбург),
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ БГПА,
А. Б. СТЕБЛОВ, РУП "БМЗ", И. А. ТРУСОВА, Р. Б. ВАЙС, БГПА,
В. В. НЕСВЕТ, Днепровский металлургический комбинат

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ И НАГРЕВА КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СЛИТКОВ

УДК 621.783

Экспериментальные исследования, направленные на изучение поля температур в крупных промышленных слитках, дают наиболее ценную и качественную информацию, являющуюся основой для проведения дальнейших теоретических расчетов тепловых процессов при подготовке к прокатке для получения качественного слитка. Вместе с тем проведение промышленного эксперимента представляет собой достаточно сложную задачу, поэтому выработать единую методику исследований не представляется возможным. Здесь необходимо учитывать не только высокую физико-химическую агрессивность расплавленной стали (при исследовании процессов затвердевания), но и специфику производства слитков: способ разлива, размеры и массивность слитка, влияние прибыльной надставки на характер температурного поля, место расположения разливочного пролета, отделения (цеха) подготовки изложниц или цеха подготовки составов, транспортировку слитков к нагревательным колодцам, особенности нагревательных устройств и ряд других факторов. С учетом изложенного выше разработаны методики экспериментального измерения температурного поля слитков в промышленных условиях, имеющие свои отличительные черты для конкретного производства в зависимости от цели исследований.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение теплового состояния блюминговых слитков при затвердевании и нагреве и выявление особенностей затвердевания листовых слитков с применением теплоизоляционных вкладышей в прибыльной части изложниц.

Исследование процессов затвердевания блюминговых слитков. При проведении промышленных экспериментов по изучению теплового состояния блюминговых слитков спокойной стали при их затвердевании и охлаждении в условиях Днепровского металлургического комбината им. Дзержин-

ского учитывали физико-химические свойства стали (в связи с достаточно глубоким погружением термопар в тело слитка) и специфику организации потока слитков в конкретном случае. Объектами исследований являлись блюминговые слитки массой 8 т из стали 45 и 35 с поперечными сечениями 736×655 мм и высотой 2800 мм, разливаемые в изложницы типа С-8. В качестве термодатчиков использовали вольфрам-рениевые термопары ВР 5/20 с электродами диаметром 0,5 мм. Электроды изолировали двухканальной алундовой соломкой. Термопару помещали в двойной чехол (внутренняя часть — кварцевое стекло, наружная — сплав ВЖ-98, пространство между ними — графитовый порошок). Свободное пространство между соломкой и отверстием стеклянного чехла засыпали мелкодисперсным безводным оксидом алюминия. Данная схема защиты термопар (рис. 1) отличается малой степенью инерционности и достаточно высокой надежностью. Методика проведения промышленного эксперимента с учетом специфики организации производства описана в работах [1, 2]. На рис. 2 приведены результаты измерений температуры по сечению слитков из стали 45 (осевая сталь) и стали 35. Следует отметить, что при измерении температур в слитке стали 35 зафиксировано температурное поле во всех трех точках, а при проведении эксперимента по измерению температур в слитке осевой стали термопара, находящаяся в точке, равноудаленной от центра и поверхности слитка, практически сразу вышла из строя. Вместе с тем замер температур в наиболее характерных точках сечения слитков (центр и поверхность) позволил выявить основные закономерности процессов затвердевания и охлаждения слитков. Очевидно, что время полного затвердевания слитков составляет 2,6—2,7 ч, температура поверхности при этом равна 1170—1190 К для слитка стали 45 и 1190—1200 К для стали 35. Время снятия теплоты перегрева стали составляет

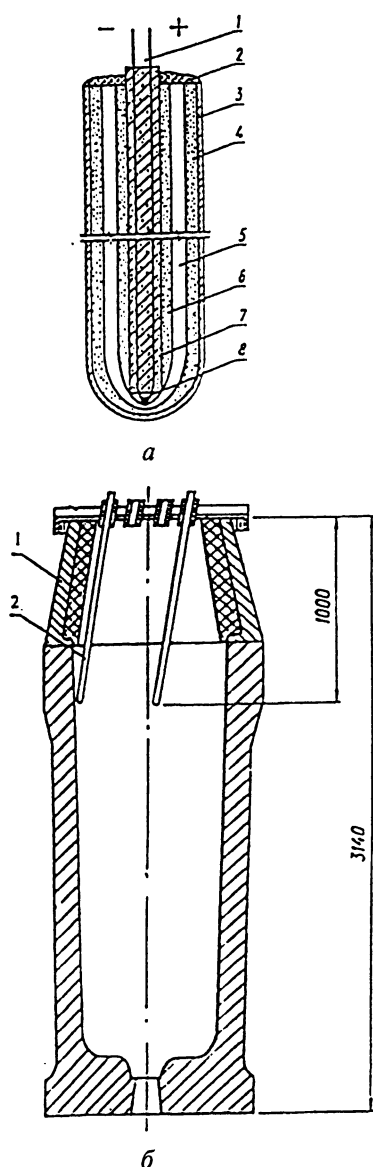


Рис. 1. Схема термодатчика (а) и экспериментальная изложница в сборе (б): а — 1 — свободные концы; 2 — замазка; 3 — внешний чехол; 4 — графитовый порошок; 5 — внутренний кварцевый кожух; 6 — алундовая засыпка; 7 — алундовая двухканальная засыпка; 8 — спай термопары ВР 5/20; б — 1 — прибыльная надставка; 2 — термодатчик

1,1—1,2 и 1,7—1,75 ч соответственно. В этот период наблюдается максимальная скорость охлаждения поверхности грани слитка — 8,5—9,1 К/мин, на ребре скорость охлаждения может достигать 10—11 К/мин. Полученные результаты были в дальнейшем использованы для математического моделирования процессов подготовки слитков к прокатке с целью совершенствования режимов нагрева слитков с жидкой сердцевиной.

Исследование особенностей процесса затвердевания листовых слитков при использовании теплоизоляционных вкладышей. Для изучения влияния теплоизоляционных вкладышей в прибыльной части изложниц на процессы затвердевания промышленных слитков, в частности для установления изменения характера температурного поля и

оценки качества слитка, были выполнены экспериментальные исследования в условиях металлургического комбината им. Ильича (г. Мариуполь). В ходе экспериментов проводили измерения в листовом уширенном книзу слитке массой 5,9 т (Ст. 3сп) поперечным средним сечением 1200×430 мм и высотой 1685 мм¹. Отливку опытных слитков вели сифоном, экспериментальную изложницу устанавливали на поддон, уложенный на отдельной тележке. Измерение температур осуществляли в утепляющей засыпке, футеровке прибыльной части, стенке изложницы и теле слитка. Прибыльную часть слитка утепляли вкладышем высотой 250 мм, шамотным кирпичом той же высоты, а уровень налива металла колебался в пределах 130—170 мм. Во всех проведенных опытах толщина утеплителя была равна 40 мм, а зеркало металла утеплялось слоем циносферной смеси толщиной 50 мм. Для измерения температур в теле слитка, утеплителях и засыпке использовали платино-платинородиевые термопары. Общий вид слитка и схема расположения термопар при измерениях приведены на рис. 3. Термопары 5 и 6 вводили в прибыльную часть слитка сверху и крепили в отверстиях рамы, установленной на торце изложницы. Для защиты термопар от воздействия жидкой стали использовали чехлы из оксида алюминия. Перед началом разливки в защитные чехлы вводили термопары в кварцевой трубке, причем горячий спай термопар выходил из кварцевой трубки для уменьшения инерции. Для измерения температур в теле изложницы использовали хромель-алюмелевые термопары в соответствующей изоляции, вмонтированные внутри чугунной пробки диаметром 30 мм, которую затем вводили в специальные отверстия на четырех горизонтах по высоте стенки изложницы (рис. 3). При этом горячие спаи термопар размещали на расстояниях 1, 5, 75 и 100 мм от внутренней поверхности изложницы.

Из опытных слитков вырезали продольные плиты толщиной 30 мм, при осмотре которых производили замер усадочных дефектов в среднем сечении слитка и оценивали макроструктуру на отпечатках по Бауману. Оказалось, что при утеплении шамотом образуется открытая усадочная раковина воронкообразного типа, которая распространяется ниже верхнего уровня прибыли на глубину 220 мм, а на глубине 280 мм появляется вторичная усадочная раковина диаметром 30 мм. В прибыльной части слитка, утепленного теплоизоляционными плитами, виден мост металла $\delta = 25$ мм с включениями газовых пустот, а локализованная усадочная раковина распространяется до глубины 230 мм. Таким образом, расхождение в размерах усадочных раковин при различном утеплении составляет порядка 2,5% от высоты слитка.

¹ В работе принимали участие О. Б. Баранов, Д. П. Кокушкин, А. С. Фрейденберг.

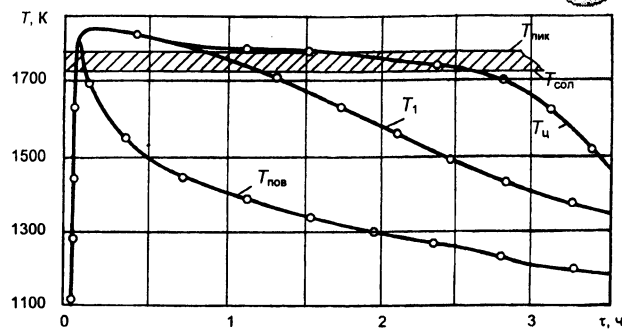
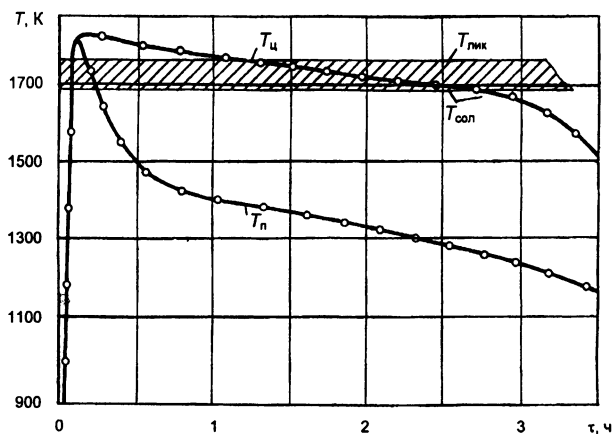


Рис. 2. Изменение температуры по сечению блюминговых слитков при затвердевании и охлаждении осевой стали (а) и стали 35 (б): T_n, T_c — температура поверхности и центра; $T_{лик}, T_{сол}$ — температура ликвидуса и солидуса

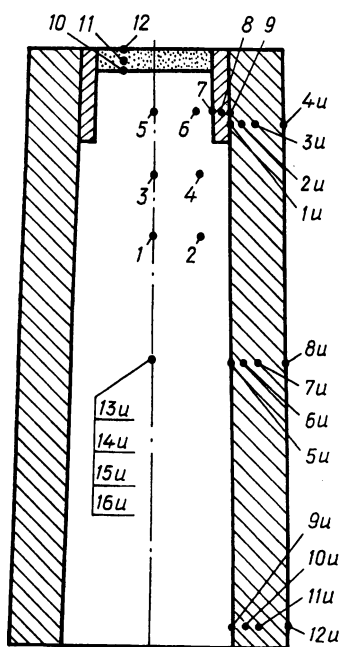


Рис. 3. Схема расположения точек замера температуры в стенках изложницы (1и—16и), вкладыша (7—9), засыпки (10—12), прибыли и теле листового слитка (1—6)

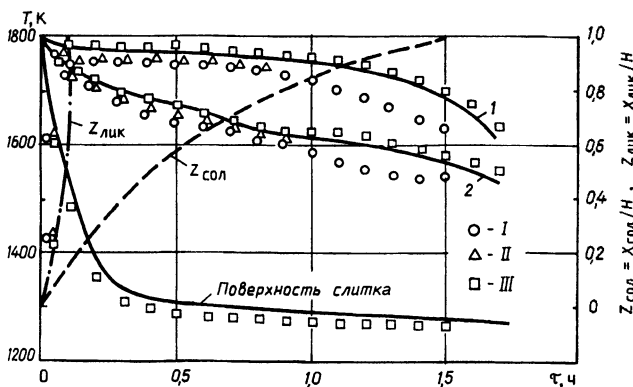


Рис. 4. Изменение температуры при затвердевании листового слитка на оси (1), на расстоянии 98 мм от поверхности (2) и на поверхности слитка. Сплошные линии — расчет при $\lambda_s = 58, \lambda_{тв} = 23 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \rho = 7200 \text{ кг/м}^3$. I — утепление вкладышем высотой 250 мм, толщиной 40 мм, $\lambda_{вкл} = 0,35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; II — утепление шамотным кирпичом высотой 250 мм, толщиной 40 мм, $\lambda_{шк} = 1,6 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; III — утепление вкладышем высотой 130 мм, толщиной 40 мм, $\lambda_{вкл} = 0,35 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$

Результаты измерения температур в теле слитка представлены на рис. 4.

Координаты горячих спаев термопар определяли по вырезанным темплетам. Длительность показаний термопар составила в первом опыте 2 ч, во втором — 0,5–0,9 ч в точках 1 и 2 соответственно, в третьем опыте — 1,7 ч. В третьем опыте горячие спаи термопар 1 и 3 устанавливали на оси слитка, а термопар 2 и 4 — на расстоянии 110 и 98 мм от поверхности соответственно. Перегиб температурной кривой, соответствующей окончанию затвердевания слитка, зафиксирован через 1,25 ч после окончания заливки слитка. В прибыльной части слитка температура падает с 1780 до 1550 К в течение 1,5 ч, т.е. скорость охлаждения прибыли выше скорости охлаждения тела слитка. Это объясняется подмораживающим действием зеркала металла, малым объемом металла в прибыли (10%), повышенным отводом теплоты по защитным чехлам. Перепад температур по толщине прибыли слитка составляет 80–100 К, что значительно меньше, чем в теле слитка (450 К). Распределение температур во вкладыше и шамоте существенно различается в период прогрева и выравнивается к окончанию затвердевания слитка.

Таким образом, при незначительном различии в средних по сечению температурах при нагреве вкладыша и кирпича количество теплоты, аккумулированное из прибыли на нагрев шамотного кирпича, в 2 раза больше, чем при нагреве вкладыша, вследствие большей удельной плотности шамота. Распределение температур по сечению стенки изложницы в области прибыли показано на рис. 5. Из рисунка видно, что в связи с существенным экранирующим эффектом вкладыша или кирпича внутренняя стенка изложницы прогревается всего лишь до 700–750 К, а внешняя — до 650–670 К. Максимальный перепад температур по сечению наблюдается в момент полного затвердевания слитка и составляет 90–100 К. При утеплении прибыли шамотом температура изложницы на 20 К выше, чем при утеплении вкладышем.

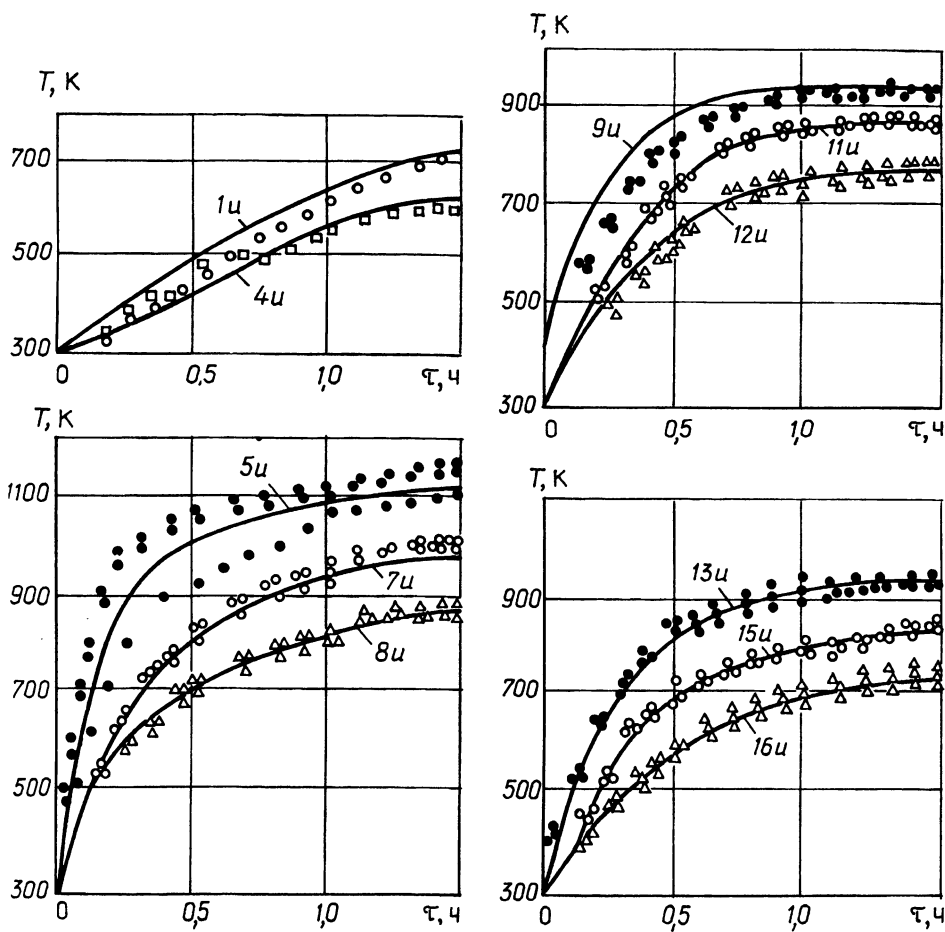


Рис. 5. Изменение температуры на внутренней и внешней поверхностях изложницы в зоне прибыли при затвердевании листового слитка: сплошная линия — расчет; точки — эксперимент

Результаты различных опытов согласуются удовлетворительно, различаясь максимум на 20—30 К, что составляет 4% от измеряемой величины. Внутренняя поверхность стенки изложницы в средней части широкой грани прогревалась до 1100—1150 К, а на узкой грани — до 940 К. Внешняя поверхность стенки изложницы в ходе опыта нагревалась до 870—900 К по широкой грани и лишь до 700—750 К — по узкой грани.

Результаты экспериментов сопоставили с данными математического моделирования, результаты которого приведены в работе [3]. При этом выявлено, что расчетные температуры удовлетворительно согласуются с данными термометрирования (расхождения не превышают 25—30 К).

Расчетом установлено и экспериментально подтверждено, что листовые слитки с отношением сторон 1:3 можно утеплять на 70% длины широкой грани, что не ведет к увеличению глубины усадочной раковины и снижает расход вкладышей от 4 до 2,8 кг/т.

Исследование процессов нагрева слитков в нагревательных колодцах. Экспериментальные исследования процессов нагрева слитков перед прокаткой проводили в условиях рекуперативных нагревательных колодцев с верхней горелкой блюминга

1500 Нижнетагильского металлургического комбината. Внутренние размеры рабочей камеры 9850×3300×4430 мм, топливо — смесь природного и доменного газов с теплотой сгорания 8374 КДж/м³. Шлакоудаление сухое. Техническая характеристика колодца следующая:

Тепловая мощность, Вт	9,65·10 ⁶
Температура подогрева, до °С:	
инжектирующего воздуха	300
воздуха горения после рекуператора	900
топлива	300
Температура нагрева металла, °С	1280
Масса садки, т	150

Температура в колодце контролируется термопарой, расположенной в его фронтальной стене. Колодцы этого типа имеют ряд преимуществ перед колодцами других конструкций: компактность размещения, малая удельная площадь на 1 т садки, небольшие затраты на нагрев, простота конструкции, возможность автоматического регулирования. Однако они имеют существенный недостаток — неравномерность температурного поля по объему ячейки. В связи с низкой скоростью подъема температуры у горелочной стены ухудшается качество нагрева слитков в этой области колодца и снижается его производительность.

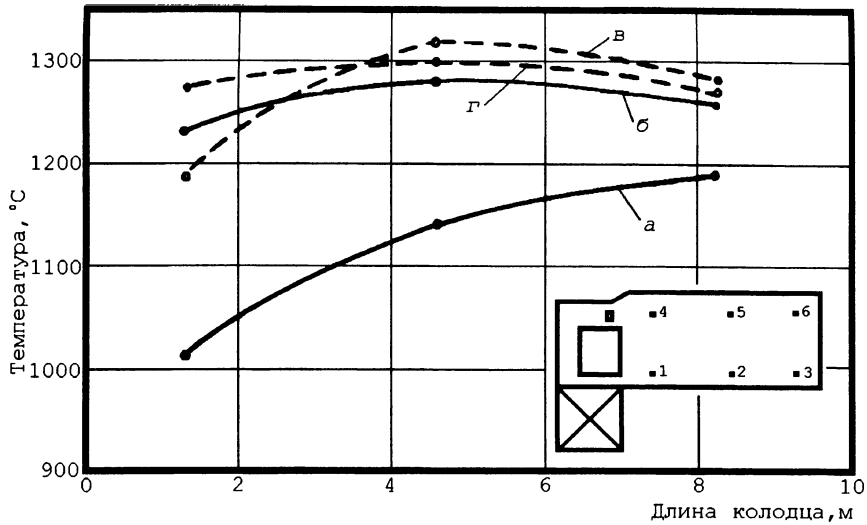


Рис. 6. Распределение температур по длине коловца: 1—6 — номера точек замера в коловцах (1, 2, 3 — нижняя часть коловца; 4, 5, 6 — верхняя часть коловца; а, б — в начале томления; в, г — в конце томления)

Для совершенствования режимов нагрева слитков необходимо знать изменение температурного поля коловца в процессе нагрева слитков. С этой целью были проведены исследования по изменению температуры внутренней кладки стен. Установлено, что в первый период нагрева сохраняется значительная неравномерность (до 70—80°C) распределения температур по высоте и длине коловца. Это особенно характерно для нагрева слитков с температурой поверхности в момент посада в коловец от 0 до 200°C (рис. 6). Как следует из рисунка, максимальные значения температур в средней верхней части коловца. Наиболее интенсивное горение наблюдается ближе к противоположной торцевой стене. В нижней части коловца

слитки обогреваются отходящими продуктами горения. При организации режимов нагрева слитков горячего посада (с температурой поверхности в момент посада 700—900°C) в первый период нагрева разница температур по объему достигает 150°C, в конце томления составляет около 20°C. Такое распределение температур в коловце является предпосылкой неодинакового качества нагрева слитков одной садки. За время эксплуатации цеха в коловцах блюминга 1500 производили нагрев слитков массой от 6 до 23 т (более 40 типоразмеров). При расчете режимов нагрева определенного типа слитков необходимо учитывать не только разницу в нагреве слитков по длине и высоте коловца, но и теплопередачу по толщине

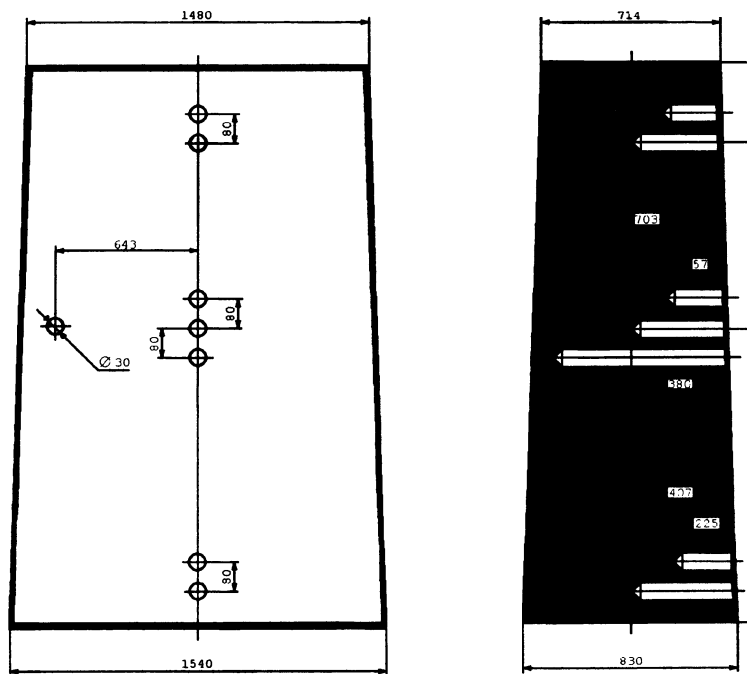


Рис. 7. Расположение отверстий в слитке УНГ-16 сечением $\frac{1480 \times 714}{1540 \times 830}$

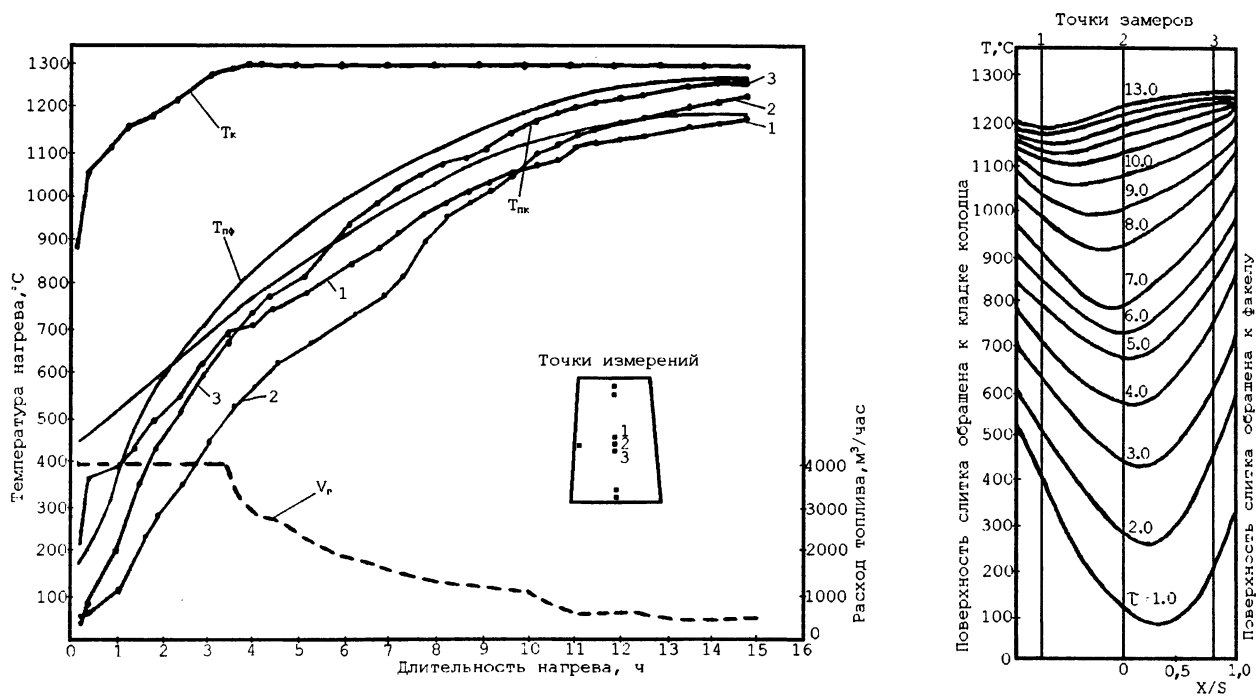


Рис. 8. Результаты экспериментальных исследований нагрева слитков УНГ-16 с зачеканенными термопарами: T_k — температура в колодце; $T_{нф}$ — температура поверхности слитка, обращенной к факелу; $T_{пк}$ — температура поверхности слитка, обращенной к кладке

слитка. Температура кладки колодца в течение загрузки полной садкой падает с 1300 до 900°C. Слитки садят, опирая их более широкой гранью на стену. При нагреве одна из сторон слитка подвергается воздействию факела, который имеет температуру около 1400°C, а другая сторона набирает тепло вместе с кладкой колодца. При значительной толщине слитка несимметричность нагрева по толщине сохраняется до выдачи металла в прокат.

С целью установления закономерностей изменения теплового состояния слитка в процессе нагрева были проведены эксперименты по нагреву холодных слитков с термопарами. Схема сверловки слитков показана на рис. 7. Опытный слиток массой 17,57 т устанавливали вместе с другими слитками, нагреваемыми по утвержденному технологическому режиму. Масса садки из семи слитков составляла 123 т. Опытный слиток был помещен в средней части колодца. Хромель-алюмелевые штывковые термопары вводили в тело слитка через специальные окна в кладке колодца. Показания термопар регистрировали в течение всего периода нагрева. Для исключения влияния подсаживаемого воздуха отверстия закладывали кирпичом и огнеупорной глиной. Было выполнено несколько вариантов нагрева. Результаты одного из экспериментов приведены на рис. 8. Из экспериментальных данных следует, что сторона слитка, обращенная к факелу в первый период нагрева, отстает от стороны, обращенной к кладке колодца. Через 2 ч нагрева температура сторон сравнивается, а затем сторона, обращенная к кладке, начинает отставать от стороны, обращенной к факелу.

Несимметричность нагрева по сечению наблюдается до конца нагрева и наименьшая температура по сечению слитка — вначале в центре, а затем она начинает смещаться к стороне, обращенной к кладке колодца. Через 14,5 ч от начала нагрева градиент температур по сечению слитка достигает установленной допустимой в технологии прокатки крупных слитков величины. Так как первоначально длительность нагрева слитков холодного посада данного типа достигала 17,5 ч, то результаты исследований позволили сократить общее время нагрева и увеличить производительность колодца от 7,0 до 8,5 т/ч, не ухудшая при этом качество нагрева и сохраняя необходимое для деформации слитка теплосодержание.

Изучение динамики температуры нагрева слитков холодного посада позволило сделать вывод о возможности изменения схемы установки слитков в колодец. Было предложено устанавливать слитки с отношением сторон поперечного сечения $\leq 1,2$ и размером по ширине до 950 мм, опирая их узкой гранью на стену колодца. Реализация этого предложения позволила улучшить теплообмен между обращенными друг к другу сторонами слитка. Широкие грани слитка были выдвинуты дальше в область более высоких температур (ось колодца), за счет чего увеличился теплообмен между слитком и факелом. Пространство колодца оказалось более заполненным, что положительно отразилось на газодинамическом режиме колодца. В результате повысилась относительная скорость нагрева слитков, улучшилось качество их подготовки к прокатке. Кроме того, предложенный способ установ-

ки слитков в колодец позволил сократить кантовку перед задачей слитка в прокат, так как слитки стали укладывать на рольганг сразу на узкую грань.

Выводы

1. Разработаны методики экспериментального измерения температурного поля при затвердевании и нагреве крупных бьюминговых и листовых слитков в промышленных условиях, имеющие свои отличительные черты для конкретного производства в зависимости от цели исследований.

2. Установлены закономерности затвердевания и охлаждения бьюминговых слитков (стали 45, 35) массой 8 т, позволившие разработать режимы нагрева слитков с жидкой сердцевиной. Выявлены особенности затвердевания промышленных листовых слитков с использованием теплоизоляции

новых вкладышей и шамотного кирпича в прибыльной части изложниц. Показано, что при утеплении вкладышем количество аккумулированной теплоты в 2 раза ниже, чем при утеплении шамотом.

3. Исследованы закономерности процесса нагрева бьюминговых слитков в условиях эксплуатации рекуперативных колодцев с верхней горелкой.

Литература

1. Промышленные теплотехнологии: Моделирование нелинейных процессов / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, А. П. Несенчук и др. Мн.: Выш. шк., 2000.

2. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Филиппов В. В. Стальной слиток. В 3 т. 2. Затвердевание и охлаждение. Мн.: Белорусская наука, 2000.

3. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Мандель Н. Л., Хопова О. Г. Эффективность использования теплоизоляционных вкладышей для улучшения качества стальных слитков // Литье и металлургия. 2001, №2. С. 119—123.



**РЕСПУБЛИКАНСКОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
"БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД"
BYELORUSSIAN STEEL WORKS
BELORUSSISHES METALLURGISCHES WERK**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ПРОВОЛОКИ РМЛ
HOSE WIRE TECHNICAL DATA
HOSE WIRE STANDARD SPECIFICATION**

Nominal diameter, mm	Tensile strength, N/mm ²	Average breaking force, N	Minimum torsions, turns	Minimum bendings, bends	Normal length on BS60, m
0,25	2150-2450	113	40	125	82000
	2450-2750	128	40	125	82000
	2750-3050	142	35	105	82000
	3050-3350	157	30	75	82000
0,29	2450-2750	178	35	95	60000
	2150-2450	163	35	105	58000
0,30	2450-2750	184	35	95	58000
	2750-3050	205	30	85	58000
	3050-3350	226	25	60	58000
0,38	2150-2450	261	35	60	32000
	2450-2750	295	35	60	32000
	2750-3050	329	30	55	32000
0,40	2150-2450	289	40	60	29500
	2450-2750	327	35	55	29500
	2750-3050	364	30	50	29500
0,50	2150-2450	452	33	40	18100
	2450-2750	510	32	40	18100
	2750-3050	569	25	30	18100
0,56	2150-2450	565	25	35	15000
	2450-2750	640	25	30	15000
	2750-3050	714	20	25	15000
0,60	2150-2450	650	31	27	14000
	2450-2750	736	30	27	14000
	2750-3050	812	25	20	14000
0,65	2150-2450	765	25	25	11000
	2450-2750	865	25	20	11000
0,70	2150-2450	885	25	20	96000
	2450-2750	1001	21	18	9600
0,71	2150-2450	910	25	20	9500
	2450-2750	1030	21	18	9500