

**Министерство высшего и среднего специального
образования БССР**

**БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ**

На правах рукописи

Инженер В.А.Грибберг

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ
СТАЛЬНЫХ ЖАРОСТОЙКИХ ТРУБ МЕТОДОМ НЕПРЕ-
РВНОГО НАМОРАЛИВАНИЯ**

Специальность 05.323. Литейное производство

А в т о р е ф е р а т

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

М и н с к 1 9 7 1

Работа выполнена в лаборатории кафедры "Машины и технология
литейного производства" Белорусского ордена Трудового Красного
Знамени политехнического института, в лаборатории физики контакт-
ных явлений Физико-технического института АН БССР и на Минском
ордене Ленина и Октябрьской Революции тракторном заводе.

Научные руководители:

член-корреспондент АН БССР, доктор
технических наук, профессор
А.И.Вейник,

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник В.И.Тутов.

Официальные оппоненты:

Лауреат Государственной премии СССР,
доктор технических наук, профессор
Л.И.Левин,

кандидат технических наук, старший
научный сотрудник Н.Г.Интяков.

Ведущее предприятие -

Научно-исследовательский институт
технологии автомобильной промышлен-
ности (Минский филиал).

Автореферат разослан " 5 " МАЯ 1971 г.

Защита диссертации состоится " 11 " ИЮНЯ 1971 г. на
заседании Объединенного Совета по присуждению ученых степеней
по механико-технологическим, машиностроительным, автотракторным
и горфяным специальностям при Белорусском ордена Трудового Крас-
ного Знамени политехническом институте.

Отзывы просим направлять по адресу: г.Минск, 27, Ленинский
проспект, 65, Белорусский политехнический институт, ученому сек-
ретарю Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Ученый секретарь Совета -
кандидат технических наук, доцент

Н.В.Кислов

В В Е Д Е Н И Е

Трубы и полые заготовки широко используются в промышленности и строительстве. Потребность в них непрерывно возрастает. Наиболее быстрыми темпами растет производство, расширяется сортимент и область применения труб из высоколегированных сталей и сплавов и, в частности, труб жаростойких. Дальнейшее развитие народного хозяйства страны приведет к увеличению удельного веса труб из высоколегированных сталей и сплавов в общем объеме производства труб. Это требует решения многих вопросов, связанных со специфичностью таких материалов и, главным образом, получения качественной полых заготовок с минимальным содержанием неметаллических включений и газов. Этим условиям хорошо отвечает метод непрерывного литья труб намораживанием, разработанный в Физико-техническом институте АН БССР под руководством члена-корреспондента АН БССР А.И.Вейника.

Процесс получения труб этим методом осуществляется следующим образом. Жидкий металл из ковша через сифонную литниковую систему поступает в цилиндрический водоохлаждаемый кристаллизатор. На внутренней поверхности кристаллизатора происходит затвердевание (намораживание) металла и образующаяся корка периодически вытягивается вверх. Извлеченная из кристаллизатора корка и составляет теле трубы. Основные достоинства метода — очень хорошие условия литья отливки, свободная усадка металла при его затвердевании и строго направленное затвердевание при интенсивном охлаждении.

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию и разработке технологического процесса литья стальных жаростойких труб методом непрерывного намораживания. Результатом работы явилось создание опытно-промышленной установки, разработка и внедрение технологического процесса литья стальных жаростойких труб на Минском ордена Ленина тракторном заводе.

Г Л А В А I

В первой главе приводится обзор литературы, в которой рассматриваются различные способы изготовления стальных труб и непрерывного литья полых цилиндрических заготовок, анализируются условия работы и выбирается материал радиационных труб.

Анализ рассмотренных работ показывает, что в настоящее время

стальные трубы изготавливаются, главным образом, горячей прокаткой, существенными недостатками которой являются многочисленность и трудоемкость операций, большое количество металлоемкого оборудования и инструмента и их износ, высокие энергозатраты, большое количество отходов металла и, как следствие, высокая стоимость труб, полученных этим методом. Для многих целей, в частности, для радиационных труб применение проката не вызвано необходимостью. Изготовление таких труб литыми позволило бы значительно снизить их стоимость. Однако до настоящего времени промышленность не располагает приемлемым способом литья стальных тонкостенных труб. Получивший в последнее время все большее распространение способ центробежного литья труб не позволяет практически получать трубы с толщиной стенки менее 15–20 мм. Известные способы непрерывного литья применяются, в основном, для получения труб из цветных металлов и сплавов. Схемы, предложенные для получения стальных труб, содержатся только в авторских заявках и судить о возможности их промышленного применения трудно.

Способ непрерывного литья намораживанием, который представляется наиболее пригодным для получения стальных труб, ранее исследовался, в основном, применительно к чугунным трубам. Причем, некоторые вопросы, такие как влияние технологических параметров процесса на формирование отливки при литье непрерывным намораживанием и ее свойства, почти не исследованы.

Использование при разработке процесса непрерывного литья стальных труб имеющихся в литературе рекомендаций по литью намораживанием чугунных труб невозможно без проведения значительных исследований, так как при непрерывном литье не только переход от одного металла к другому, но и любая новая марка чугуна или стали, любое новое поперечное сечение отливаемой заготовки имеет свои индивидуальные особенности. Почти отсутствуют данные о свойствах выбранной марки стали Х15Н13Ю3Л.

На основе анализа литературного обзора задача исследования формулируется следующим образом: теоретически изучить процесс и вывести необходимые расчетные формулы, позволяющие определять оптимальные условия изготовления полых цилиндрической непрерывной отливки при литье намораживанием; разработать рабочую схему процесса литья стальных труб; изучить влияние технологических пара-

метров на стабильность процесса, качество и толщину отливки; исследовать свойства непрерывной стальной отливки. Конечной целью исследования является разработка и создание легкой машины и внедрение метода непрерывного литья немораживанием для получения радиационных труб в производство.

Г Л А В А П

Вторая глава посвящена теоретическому анализу процесса и определению термофизических свойств материала отливки.

При решении задачи вводится ряд упрощений реальной схемы процесса. Область формирования отливки разбивается на две самостоятельные характерные зоны. Первая - зона формирования начальной корки, в которой периодически возникает плотный контакт жидкого металла, а потом твердой корки с рабочей поверхностью кристаллизатора. Интенсивность охлаждения в этой зоне весьма велика. Вторая зона расположена над первой и ограничивается сверху уровнем металла в кристаллизаторе. В этой зоне теплообмен между отливкой и кристаллизатором происходит через газовый зазор и интенсивность охлаждения отливки значительно уменьшается. Считается, что коэффициент теплопередачи λ , от отливки к охлаждающей среде в каждой зоне имеет постоянное значение.

Для решения задачи о затвердевании отливки в интервале температур используется метод эквивалентной отливки. При этом удельная эффективная теплота кристаллизации ζ эф., учитывающая всю теплоту, выделяющуюся в интервале кристаллизации, и теплоту перегрева, определяется из выражения:

$$\zeta_{эф} = \zeta_1 + \frac{1}{2} (C'_1 + C_1) (T_{лик} - T_{сол}) + C'_1 (T_{зал} - T_{лик}), \quad (I)$$

где ζ_1 - истинная удельная теплота кристаллизации; C'_1 - удельная теплоемкость жидкого металла; C_1 - удельная теплоемкость твердого металла; $T_{лик}$, $T_{сол}$, $T_{зал}$ - температуры ликвидуса, солидуса и заливки.

Расчетная температура кристаллизации $T_{кр}$ определяется как среднеинтегральная температура, при которой выделяется количество тепла, равно $\zeta_{эф}$:

$$T_{кр} = \frac{\frac{1}{2} (T_{лик} + T_{сол}) \zeta_1 + \frac{1}{4} (T_{лик}^2 - T_{сол}^2) (C'_1 + C_1) + \frac{1}{2} (T_{зал}^2 - T_{лик}^2) C'_1}{\zeta_{эф}}. \quad (2)$$

Положение фронта затвердевания непрерывной полый цилиндрической отливки, затвердевающей снаружи, при линейном распределении температуры в ее стенке ($n = 1$) предлагается определять по формуле:

$$\frac{H - H_2}{W} = \frac{X_1^2}{\alpha} \left[B_1 (\delta - \delta_2) + B_2 (\delta^2 - \delta_0^2) + B_3 (\delta^3 - \delta_0^3) + B_4 \ln \frac{1 + \delta Bi_1}{1 + \delta_2 Bi_1} \right] \quad (3)$$

где H - вертикальная координата рассматриваемого сечения, отсчитываемая от нижнего торца кристаллизатора; H_2 - вертикальная координата начального сечения; W - скорость литья; X_1 - радиус отливки; α - коэффициент температуропроводности затвердевшей корки; B_1 , B_2 , B_3 и B_4 - постоянные коэффициенты;

$$B_1 = \frac{1}{Bi_1} \left(L + \frac{1}{6Bi_1} + \frac{1}{2} \right); \quad B_2 = \frac{1}{2} \left(L + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{2Bi_1} \left(L + \frac{1}{6} \right);$$

$$B_3 = \frac{1}{3} \left(L + \frac{1}{3} \right); \quad B_4 = - \frac{1}{2Bi_1^2} \left(1 + \frac{1}{3Bi_1} \right);$$

$Bi_1 = \frac{\alpha_1 X_1}{\lambda_1}$ - критерий Био, характеризующий относительную интенсивность теплообмена между отливкой и окружающей средой; α_1 - коэффициент теплопередачи от отливки к окружающей среде; λ_1 - коэффициент теплопроводности материала отливки;

$L = \frac{\gamma_{кр}}{c_1 \nu_{кр}}$ - критерий, специфический для процессов, сопровождающихся фазовыми превращениями, или относительная теплота кристаллизации; c_1 - удельная теплоемкость материала отливки; $\nu_{кр} = T_{кр} - T_c$ - температура кристаллизации, отсчитываемая от температуры T_c окружающей среды; $\delta = \frac{\xi}{X_1}$ - относительная толщина затвердевшей корки; ξ - толщина затвердевшей корки к моменту времени $t = \frac{H}{W}$; $\delta_2 = \frac{\xi_2}{X_1}$ - относительная толщина корки, соответствующая начальным условиям; ξ_2 - толщина затвердевшей корки, соответствующая начальным условиям.

Для расчета технологического процесса выведена формула, связывающая тепловые и технологические параметры процесса с термодинамическими свойствами материала отливки. Формула выведена из уравнения теплового баланса системы жидкий металл - твердая корка - кри-

сталлизатор и имеет следующий вид:

$$\frac{H_m}{W} = \frac{(2X_1 - \xi) \rho_l \left[z'_{эф} + \frac{c_l v_{кр}}{2 \left(1 + \frac{\lambda_l}{\alpha_{ик} \xi} \right)} \frac{1 - \frac{\xi}{3X_1}}{1 - \frac{\xi}{2X_1}} \right]}{2X_1 \alpha_{ср} v_{кр} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{2\lambda_l}{\alpha_{ср} \xi}} \right)}, \quad (4)$$

где H_m - высота уровня металла в кристаллизаторе; ξ - конечная толщина отливки; ρ_l - плотность материала отливки; $z'_{эф} = z_{эф} - c_l (T_{кр} - T_{сст})$; $\alpha_{ик}$ - коэффициент теплопередачи от отливки к охлаждающей среде на уровне мениска жидкого металла; $\alpha_{ср}$ - средний по высоте кристаллизатора коэффициент теплопередачи от отливки к среде.

Уравнение теплового баланса может быть решено также относительно скорости литья. Решение имеет вид:

$$W = \frac{12X_1 \alpha_{ср} v_{кр} \lambda_l (\alpha_{ик} \xi + \lambda_l) H_m}{\xi \rho_l [3z'_{эф} (\alpha_{ик} \xi + \lambda) (2X_1 - \xi) + c_l v_{кр} \alpha_{ик} \xi (3X_1 - \xi)] (\alpha_{ср} \xi + 2\lambda_l)}. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) использованы при обработке экспериментальных данных по исследованию технологического процесса литья непрерывным намораживанием, приближенном расчете возможной разностенности отливки и разработке технического задания на проектирование литейной машины. Расчеты по формуле показали хорошее совпадение теоретических результатов с экспериментальными.

Расчет по формулам (4) и (5) потребовал знания термофизических параметров материала отливки. Применение новой, почти не исследованной марки стали Х15Н13Ю3Л, значительно затруднило выбор этих величин. При определении термофизических свойств были использованы приближенные эмпирические формулы, способ аддитивности, данные для марок стали, близких по химическому составу к заданной, и результаты специальных экспериментов. Погрешность при определении термофизи-

ческих свойств всеми этими способами не превышает 5-7%.

Г Л А В А Ш

В третьей главе рассматриваются результаты экспериментального исследования, относящегося к выбору рабочей схемы процесса.

Рассмотренная принципиальная схема является скорее теоретической моделью процесса литья намораживанием и не отражает многие характерные его особенности. Для конкретизации схемы процесса и его практического осуществления необходимо решить ряд важных технологических задач, связанных с получением качественной отливки. К числу таких задач относятся определение режима движения отливки относительно кристаллизатора, выбор материала кристаллизатора и изучение различных вариантов соединения кристаллизатора с литниковой системой.

Циклический режим движения отливки характеризуется перемещением отливки на расстояние ΔH за время одного цикла T_c , причем время цикла складывается из времени движения отливки t_{gl} и времени $t_{ост}$, в течение которого отливка неподвижна относительно кристаллизатора. При этом скорость литья определяется из выражения:

$$W = \frac{\Delta H}{t_{gl} + t_{ост}} \quad (6)$$

Для формирования отливки решающим является время $t_{ост}$, которое определяет толщину начальной корки в самом слабом месте, на уровне ΔH .

Экспериментально было определено минимально допустимое время остановки, которое составило для чугуна $\sim 0,4$ сек, для углеродистой стали $\sim 0,28$ сек, для стали X15H1303Л $\sim 0,16$ сек. Для получения стабильных результатов это время необходимо увеличить в 1,5-2 раза.

Режим движения определяется не только временем $t_{ост}$, но и временем t_{gl} , которое связано с $t_{ост}$ зависимостью $t_{gl} = 0,5 t_{ост}$. Это соотношение, рекомендованное для чугуна, было экспериментально проверено для углеродистой и жаростойкой стали и показало хорошие результаты.

Для правильного выбора материала кристаллизатора было проведено сравнительное исследование теплового режима стальных и медных

кристаллизаторов при литье методом непрерывного намораживания стальных труб. Температурное поле кристаллизатора изучали при помощи хромель-алюмелевых термопар, установленных на рабочей поверхности кристаллизатора (на глубине 0,15-0,25 мм), внутри его стенки и на охлаждаемой поверхности. Термопары располагали на четырех уровнях по высоте кристаллизатора. Показания термопар фиксировались осциллографом Н-700. Тепловой поток в исследуемом сечении определяли по перепаду температур в стенке кристаллизатора, а по тепловому потоку рассчитывали толщину затвердевшей корочки.

Показано, что через медный кристаллизатор отводится несколько больший тепловой поток, чем через стальной. Толщина затвердевшей корочки также увеличивается, но незначительно.

Температура рабочей поверхности стального кристаллизатора в зоне формирования достигает 1150-1250°K, а амплитуда колебаний, вызываемых циклическим режимом движения отливки, составляет 450°. Температура рабочей поверхности кристаллизатора в вышележащих зонах падает до 500-600°K, а на водоохлаждаемой поверхности до 350-420°K. Высокая температура рабочей поверхности стального кристаллизатора вызывает частичное приваривание начальной корки к кристаллизатору и нарушение процесса литья. Значительные перепады температуры по высоте и толщине стального кристаллизатора способствуют его короблению и быстрому выходу из строя.

Температурный режим медного кристаллизатора значительно мягче. Колебания температуры рабочей поверхности в зоне формирования начальной корки происходят в интервале 550-700°K. Резко уменьшаются, по сравнению со стальным кристаллизатором, перепады температуры по высоте и толщине стенки, что объясняется высокими теплопроводностью и теплоаккумулирующей способностью меди. В результате почти отсутствует коробление кристаллизатора, резко возрастает срок его службы, приваривания отливки не наблюдается.

В рабочей схеме процесса литья непрерывным намораживанием существенную роль играет узел сочленения кристаллизатора с литниковой системой, который определяет стабильность процесса и качество отливки. Предварительные опыты показали невозможность соединения кристаллизатора непосредственно с литниковой системой и необходимость применения соединительного огнеупорного стаканчика. Были определены основные требования к материалу стаканчика: прочность, плотность, вы-

сокие огнеупорность и термостойкость, низкие теплопроводность и теплоаккумулирующая способность, хорошая обрабатываемость. Было проведено свыше 200 опытных плавок по подбору материала и конфигурации соединительного стаканчика. Были опробованы стаканчики приставного и вставного типа из шамота, магнезита, динаса, карборунда. От применения магнезита и динаса пришлось отказаться из-за их низкой термостойкости, а карборунда - из-за очень плохой обрабатываемости.

Применение приставного шамотного стаканчика приводило к разрушению затвердевающим металлом кромки стакана, попаданию металла под кристаллизатор и прекращению процесса вследствие внутреннего обрыва. Со вставным шамотным стаканчиком удалось получить трубы длиной 2,5-3,0 м, но отливка получалась с развитыми отсечками (кольцевой отпечаток места стыка соединительного стаканчика с кристаллизатором в поперечном сечении отливки), содержащими включения керамики.

В целях получения стальных жаростойких труб без поверхностных дефектов типа отсечек были опробованы графитовые втулки толщиной 4-5 мм и высотой 15-60 мм, которые вставляли в соответствующую точку в кристаллизаторе таким образом, чтобы внутренняя поверхность втулки являлась продолжением рабочей поверхности кристаллизатора, а нижняя часть ее выходила из кристаллизатора на 7-15 мм и соединялась с литниковой системой. Таким способом удалось получить трубы без отсечек, но максимальной длиной до 1,5 м, так как процесс нарушался из-за механического и химического разрушения графитовой втулки жидкой сталью в месте формирования начальной корки. Подобная схема может быть рекомендована для получения непрерывным намораживанием отливок из чугуна и цветных сплавов.

Наилучшие эксплуатационные качества показал шамотографит, который, отвечая основным требованиям, предъявляемым к переходному стаканчику, является недефектным материалом и широко применяется в металлургической промышленности. Была проведена серия опытов, позволившая определить оптимальную конфигурацию вставного шамотографитового соединительного стаканчика. При использовании этого стаканчика были стабильно получены качественные стальные трубы длиной более 5 м, выдержавшие испытания в термических печах в качестве жаростойких радиационных труб.

В четвертой главе излагаются результаты теоретического и экспериментального исследования технологических параметров процесса и определяются условия стабильного получения качественной равностенной отливки.

Исследования проводили на экспериментальной установке, основными элементами которой являются: кристаллизатор, литниковая система, тянущее и удерживающее устройства и привод. В качестве материала отливки использовали сталь X15H13O3Л. Во всех опытах фиксировали высоту рывка ΔH , частоту циклов N , высоту уровня металла в кристаллизаторе H_M , температуру заливки $T_{зал}$ и толщину отливки ξ . Приведена методика определения всех перечисленных параметров, а также температур солидуса и ликвидуса стали X15H13O3Л, необходимых для использования расчетных формул при обработке экспериментальных данных. Найдено, что $T_{сол} = 1693^\circ\text{K}$, а $T_{лик} = 1733^\circ\text{K}$. Скорость литья определяли из выражения $W = N \cdot \Delta H$.

Все опыты проводили при постоянном режиме движения $t_{гб} = 0,5 t_{ост}$, при отливке трубы с наружным диаметром 100 мм.

Изучали влияние технологических параметров на толщину и качество отливки и стабильность процесса литья.

Влияние скорости литья изучали при $T_{зал} = 1783^\circ\text{K}$ и различных значениях H_M от 60 до 200 мм. С увеличением W при фиксированном значении H_M ξ уменьшается. Теоретически и экспериментально была определена зависимость $\xi = f(W)$. Согласование теоретических и экспериментальных данных удовлетворительное. Скорость литья существенно влияет на стабильность процесса. При $W > 3,5$ м/мин уменьшается прочность корки и учащаются обрывы трубы преимущественно в начальный период литья. При $W < 1,0$ м/мин появляется возможность перемерзания литниковой системы.

Влияние частоты циклов и высоты рывка изучено при $T_{зал} = 1783^\circ\text{K}$ и $H_M = 200$ мм. N и ΔH влияют на ξ аналогично W . Частота циклов оказывает существенное влияние на развитие отсечки, глубина которой увеличивается с уменьшением N . Испытания с разрыв образцов, вырезанных из трубы с сохранением поверхностных слоев, показали, что при $N = 245$ ц/мин предел прочности на растяжение $\sigma_b = 414$ мн/м², а при $N = 88$ ц/мин $\sigma_b = 330$ мн/м². Установлено, что стабильность процесса улучшается при уменьшении N и ΔH , однако

их чрезмерное уменьшение может привести к перемерзанию литниковой системы.

Влияние высоты уровня металла на толщину отливки исследовали при $T_{\text{зкл}} = 1783^{\circ}\text{K}$ и различных W от 1 до 4 м/мин. Показано, что с увеличением $H_{\text{м}}$ увеличивается ξ , но с различной скоростью по высоте кристаллизатора, с большей ξ в нижних его зонах и с меньшей в верхних. Влияние высоты уровня металла на стабильность процесса и качество отливки незначительно.

Влияние температуры заливки исследовали в диапазоне $1743\text{--}1843^{\circ}\text{K}$. Установлено, что в исследованных пределах температура заливки незначительно влияет на толщину и качество отливки и стабильность процесса.

Установлено, что оптимальные технологические параметры процесса следующие: $W = 1,0\text{--}3,5$ м/мин; $N = 60\text{--}150$ ц/мин; $\Delta H = 10\text{--}40$ мм; $H_{\text{м}} = 120\text{--}200$ мм; $T_{\text{зкл}} = 1750\text{--}1800^{\circ}\text{K}$. Построена номограмма для определения режима вытяжки труб диаметром 100 мм требуемой толщины.

Показано, что при использовании кристаллизаторов с гладкой рабочей поверхностью возможно образование значительной разностенности отливок вплоть до потери устойчивости сечения и полного искажения профиля трубы. Причиной разностенности является образование неравномерного по периметру газового зазора между отливкой и кристаллизатором, определяемого усадкой отливки в процессе ее формирования. Неравномерный газовый зазор приводит к различной по периметру интенсивности охлаждения отливки. Величина возможной разностенности определена приближенным расчетом с использованием формул главы II.

С неравномерным газовым зазором и различной по периметру интенсивностью охлаждения отливок связан еще один серьезный дефект — развитие поверхностных отсечек в сквозные микротрещины.

Было установлено, что отливки, которые при последующем испытании дают заметную течь по отсечкам, покидают кристаллизатор при неодинаковой температуре поверхности $T_{\text{ли}}$ с различных сторон. В местах, где газовый зазор минимален $T_{\text{ли}} = 950\text{--}1150^{\circ}\text{K}$, а там, где охлаждения отливки осуществляется через газовый зазор значительной величины, $T_{\text{ли}} = 1450\text{--}1550^{\circ}\text{K}$. Внутренняя поверхность отливки на выходе из кристаллизатора по всему периметру имеет температуру, близ-

кую к $T_{кр}$. При охлаждении отливки на воздухе с малой интенсивностью происходит выравнивание температуры по сечению. При этом в различных частях отливки возникают сжимающие либо растягивающие напряжения, которые приводят к образованию микротрещин.

В результате проведенных исследований по регулированию газового зазора предложена конструкция кристаллизатора с продольными пазы на рабочей поверхности. При попадании в кристаллизатор металл заполняет пазы и образует приливы на начальной корке. При перемещении начальной корки вверх приливы скользят по пазам, равномерно оттягивая отливку от поверхности кристаллизатора и способствуют образованию одинакового по сечению газового зазора.

Были проведены опыты по определению оптимального профиля рабочей* поверхности кристаллизатора. Установлено, что при литье стальных жаростойких труб необходимо использовать кристаллизаторы с продольными пазы овального профиля глубиной 0,4-0,5 мм и шириной 1,2-1,5 мм, с равномерной глубиной пазов на высоте двух рынков и последующим уменьшением глубины пазов до 0,1-0,15 мм у верхнего торца кристаллизатора. На кристаллизаторе такого профиля получены отливки без заметной разностенности и микротрещин по отсечкам.

Г Л А В А У

В пятой главе приводятся результаты экспериментального исследования структуры и свойств непрерывной стальной отливки. Изучены структура и свойства двух марок сталей: углеродистой 40Л и жаростойкой Х15Н13Ю3Л в отливках, изготовленных различными способами (в землю, в кокиль и методом непрерывного намораживания) в литом и термообработанном состоянии. Для стали 40Л исследовали следующие свойства: предел прочности на растяжение, относительное удлинение и сужение, ударную вязкость, твердость и плотность.

Исследование свойств стали Х15Н13Ю3Л проводили в значительно большем объеме. Определяли: предел прочности на растяжение, относительное удлинение и сужение при нормальной и высокой (1173°К) температурах, ударную вязкость, жаростойкость, плотность. Для того, чтобы оценить влияние отсечек на прочность материала трубы были проведены сравнительные испытания на разрыв темплетов, вырезанных из трубы, отлитой непрерывным намораживанием, и катаной трубы. Проведены сравнительные испытания литой и катаной труб на сплющивание. Исследовано наличие ликвации по длине и толщине стенки трубы. В ра-

боте приводится подробная методика исследования свойств и микроструктуры отливок из сталей 40Л и Х15Н1ЗЮЗЛ.

Углеродистую и жаростойкую стали выплавляли в индукционной печи с кислой футеровкой. Металлом одной плавки заливали заготовки в землю, в кокиль и трубу методом непрерывного намораживания, из которых затем на одинаковом удалении от поверхности отливки изготавливали образцы для исследований.

Результаты испытаний для различных отливок из стали 40Л в литом и отожженном состоянии приведены в табл. I.

Таблица I

Вид отливки	С в о й с т в а					
	σ_b Мн/м ²	δ %	ψ %	α_k Мдж/м ²	H_v	ρ кг/м ³
Отливка, изготовленная в земляной форме (без отжига)	559	9,0	12,0	0,245	159	7750
Кокильная отливка (без отжига)	598	9,2	11,5	0,294	163	7780
Непрерывная отливка (без отжига)	681	9,1	9,9	0,343	174	7820
Отливка, изготовленная в земляной форме (с отжигом)	551	14,0	16,0	0,500	136	
Кокильная отливка (с отжигом)	559	16,8	25,8	0,745	138	
Непрерывная отливка (с отжигом)	588	22,2	42,6	1,117	146	

Благодаря высокой интенсивности охлаждения, сифонной заливке и обильному питанию корки жидкой фазой в непрерывной отливке не наблюдается пористости, ликвационных пороков и плотность ее выше, чем у отливок, изготовленных в земляной и кокильной форме. Это и является одной из основных причин значительного повышения механических свойств у непрерывных отливок.

Микрованализ шлифов показал, что неметаллических включений в непрерывной отливке меньше, они распределены более равномерно и находятся в более мелкодисперсном состоянии, чем в отливках, изготовленных литьем в землю и в кокиль. Структура отливок из стали 40Л, изготовленных всеми тремя способами, перлитно-ферритная. В непрерыв-

ной отливке феррит расположен как по границам зерен, так и по полю зерна в виде мелких включений. Непрерывная отливка формируется при постепенном извлечении затвердевающей части металла из зоны формирования и замене его перегретым жидким расплавом. При этом большого количества центров кристаллизации в жидком металле не возникает и происходит направленный рост дендритов от фронта кристаллизации к центру. Высокая интенсивность охлаждения способствует образованию мелкодисперсного перлита. Структура непрерывной отливки в литом состоянии, благодаря быстрому охлаждению, получается менее равновесной, ближе по своему строению к эвтектидной. При отжиге происходит резкое измельчение зерна в структуре непрерывной отливки. После отжига структура становится более равновесной, что и объясняет выравнивание свойств у отливок, изготовленных различными способами.

Свойства отливок из стали Х15Н13О3Л также заметно улучшаются при изготовлении этих отливок методом непрерывного намораживания. Результаты некоторых испытаний отливок из стали Х15Н13О3Л представлены в табл.2.

Таблица 2

Вид отливки	Свойства							
	σ	δ	ψ	a_k	ρ	$\sigma_{1200^\circ\text{K}}$	$\delta_{1200^\circ\text{K}}$	$\psi_{1200^\circ\text{K}}$
	МН/М ²	%	%	МДж/М ²	кг/М ³	МН/М ²	%	%
Отливка, изготовленная в земляной форме (без отжига)	438	23,2	23,3	0,529	7580	102,0	16,4	18,5
Кокильная отливка (без отжига)	494	22,5	24,7	0,940	7600	110,8	15,9	19,0
Непрерывная отливка (без отжига)	616	32,5	32,2	1,578	7660	102,0	27,9	28,0
Отливка, изготовленная в земляной форме (с отжигом)	569	15,6	18,9	0,243		102,0	16,8	23,9
Кокильная отливка (с отжигом)	646	14,2	22,6	0,435		113,8	13,8	14,1
Непрерывная отливка (с отжигом)	680	24,8	25,0	0,524		102,0	17,7	15,0

Материал отливок, изготовленных методом непрерывного намораживания, с высокой интенсивностью охлаждения при затвердении находится в напряженном состоянии и структура неравновесна, что приводит к повышению прочности. При высокотемпературных испытаниях во время нагрева внутренние напряжения в металле снимаются, а структура выравнивается, что сглаживает различие в прочности у отливок, полученных с различной интенсивностью охлаждения.

Жаростойкость непрерывной отливки (привес составил 0,0280 г/м³час) также выше, чем у отливок, изготовленных в земляной (привес 0,0318 г/м³час) и кокильной (привес 0,0343 г/м³час) формах. При сравнении на нестандартных образцах жаростойкости катаных труб из стали X23Ni8T и труб, отлитых непрерывным намораживанием из сталей марок X23Ni8L и X15Ni30ZL, получены следующие результаты: X23Ni8T - привес 0,1003 г/м³час; X23Ni8L - 0,1130 г/м³час; X15Ni30ZL - 0,0700 г/м³час. Повышенная жаростойкость стали X15Ni30ZL объясняется тем, что на поверхности, наряду с образованием окислов хрома, образуются окислы алюминия Al_2O_3 , создающие плотную защитную пленку.

Испытания на растяжение темплетов из литой и катаной труб показали, что наличие отсечек незначительно (с 519 до 442 Мн/м²) снижает прочностные свойства материала литой трубы и резко (почти в 3 раза) снижает его пластические свойства. Испытания на сплющивание литые и катаные трубы выдержали одинаково хорошо. Химической неоднородности в трубах, отлитых непрерывным намораживанием, не обнаружено.

Исследование микроструктуры отливок из стали X15Ni30ZL, полученных различными способами, показывает, что наиболее благоприятную аустенитную структуру с мелкодисперсным выделением упрочняющих фаз ($NiAl$ и карбиды) имеет непрерывная отливка, что и является одной из главных причин ее высоких механических свойств. Зерно в микроструктуре непрерывной отливки имеет дендритное строение и, вследствие строго направленной кристаллизации, имеет вытянутую форму. По мере удаления от наружной поверхности трубы интенсивность теплоотвода уменьшается и вытянутость зерен становится менее заметной. В отливках, изготовленных в металлической и земляной формах, зерна значительно крупнее. Границы зерен получают утолщенными, вследствие выделения при более медленной кристалли-

зации большего количества карбидов и β - фазы. В результате этого усиливается интеркристаллитная коррозия и снижается жаростойкость стали.

Проведенные исследования структуры и свойств непрерывной отливки позволили сделать вывод о возможности и целесообразности использования литых труб из стали X15H1303Л в качестве радиационных труб для термических печей взамен катаных труб из стали X23H18Т.

Г Л А В А У I

В шестой главе рассматривается внедрение процесса в заводских условиях. Обсуждаются конструкция литейной машины, промышленные испытания полученных труб и определяется экономическая эффективность процесса.

Проведенные исследования позволили создать опытно-промышленную двухручьевую установку для литья труб непрерывным намораживанием. Установка предназначена как для получения труб в производственных условиях на Минском тракторном заводе, так и для проведения широкого диапазона исследований. Литейная машина состоит из следующих основных узлов: кристаллизатор в сборе, станина в сборе, привод, кулачковый механизм, система рычагов, тянущие и удерживающие устройства, механизм подъема литниковой системы.

Главной частью установки является кристаллизатор, который служит для получения отливки требуемой конфигурации и создания интенсивного отвода тепла от затвердевающей отливки. Рабочая втулка цилиндрического сечения изготовлена заодно с нижним цилиндрическим фланцем, что улучшает теплоотдачу в зоне начального рывка. Рабочая втулка с наворачивающимся на нее верхним фланцем монтируется в сварном кожухе, снабженном двумя коллекторами для подвода и отвода воды. Наличие резиновых прокладок создает возможность свободного расширения рабочей втулки в продольном направлении при нагреве. Оптимальная толщина стенки рабочей втулки 8-12 мм, высота - 180-200 мм; материал - медь М1, М2. Длительные испытания в лабораторных и производственных условиях показали, что такой кристаллизатор прост по конструкции и надежен в эксплуатации.

Привод машины позволяет получать 27 различных значений частоты циклов в пределах от 4 до 200 ц/мин. Кулачковый механизм, преобразуя вращательное движение в возвратно-поступательное, может задавать три различных режима движения: 2/1, 1/1 и 1/2. Система рычагов передает в звратно-поступательное движение тянущим захватом. Ее

конструкция позволяет плавно изменять высоту рычага от 0 до 100 мм. Кроме того, система рычагов снабжена винтовым устройством, позволяющим изменить высоту рычага в процессе вытяжки трубы. Благодаря этому устройству был решен вопрос стабилизации начального момента процесса литья. Начиная вытяжку трубы при малой высоте рычага, затем, в течение короткого промежутка времени (5-6 сек), плавно увеличивают высоту рычага, доводя скорость литья до заданной. Это позволило работать на повышенных частотах 100-200 ц/мин, при которых качество получаемых труб выше.

Проведенные испытания труб проведены в безмуфельных агрегатах газовой цементации в термическом цехе Минского тракторного завода. Испытания показали, что стойкость литых радиационных труб, полученных методом непрерывного намораживания из стали X15H13O3Л не уступает стойкости катаных радиационных труб из стали X23H18T.

Рассчитан экономический эффект внедрения процесса для конкретных условий получения труб на действующей установке. При расчете использованы нормативы и цены, действующие в настоящее время на Минском тракторном заводе. Экономический эффект от замены катаных радиационных труб для термических печей литыми составил 1275 руб. на тонну труб, что в масштабах Минского тракторного завода дает 40400 руб. экономии в год.

Разработана технологическая инструкция для изготовления в заводских условиях радиационных труб из стали X15H13O3Л методом непрерывного намораживания.

В заключение работы рассматриваются перспективы развития процесса при его массовом внедрении в производство.

В ы в о д ы

I. Теоретически и экспериментально исследован процесс получения литых стальных жаростойких труб методом непрерывного намораживания. На основе анализа условий формирования полой цилиндрической отливки при литье намораживанием разработана рабочая схема процесса и найдены параметры, определяющие устойчивость технологического режима. Установлена связь между основными параметрами процесса и свойствами готового изделия. Результаты исследования использованы при внедрении процесса в производство.

2. На основе тепловой теории литья получены приближенные аналитические зависимости, связывающие между собой тепловые и технологические параметры процесса и термофизические свойства материала отливки. Выведенные формулы использованы при разработке технологического процесса и проектировании литейной машины.

3. В результате исследования тепловых и технологических особенностей процесса литья стальных труб методом намораживания установлено, что кристаллизатор должен изготавливаться со свободно расширяющейся вдоль оси втулкой толщиной 8–12 мм из меди марок М1, М2. Для ликвидации разностенности и причин трединообразования в нижней части рабочей втулки необходимо выполнять продольные пазы овального профиля глубиной $0,4 \pm 0,5$ мм и шириной 1,2–1,5 мм. Разработана конструкция кристаллизатора.

4. Теоретический анализ и экспериментальные исследования показали, что оптимальные технологические параметры процесса литья стальных жаростойких труб таковы: скорость литья 1,0–3,5 м/мин, частота циклов 60–150 ц/мин, высота рывка 10–40 мм, высота уровня металла в кристаллизаторе 120–200 мм, температура заливки 1750–1800°K. Для определения режима вытяжки труб построена номограмма.

5. Устойчивое получение качественной отливки достигается при соединении кристаллизатора с литниковой системой намотографитовым стаканчиком. Стаканчик цилиндрической формы верхн. и буртом шириной 3–4 мм вставляется внутрь кристаллизатора на глубину 8–10 мм, а нижней своей частью соединяется с литниковой системой.

6. Для стабилизации процесса в начальный период следует начинать вытяжку трубы из кристаллизатора при пониженной скорости 0,8–1,0 м/мин с выходом на оптимальный режим в течение 5–6 сек. Разработано устройство для изменения скорости в процессе вытяжки трубы.

7. Вследствие хороших условий питания и односторонней направленной кристаллизации при интенсивном охлаждении способ литья непрерывным намораживанием обеспечивает получение отливок с более высокими физико-механическими свойствами, чем другие способы литья. Например, непрерывная и кокильная отливки из стали Х15Н13О3Д имеют в литом состоянии соответственно следующие свойства: $\sigma_{\lambda} = 616$ и 494 Мн/м²; $\delta = 32,5\%$ и $22,0\%$; $\alpha_{\kappa} = 1,58$ и $0,94$ Мдж/м²; $\rho = 7660$ и 7600 кг/м³.

8. Производственные испытания двух партий литых радиационных труб из стали Х15Н13О3М показали, что их стойкость не уступает стойкости катаных труб.

9. Разработана и пущена в эксплуатацию на Минском тракторном заводе опытно-промышленная двухручьева литейная машина.

10. Отработан и внедрен в производство технологический процесс получения стальных жаростойких труб способом непрерывного намораживания. Экономический эффект от внедрения составляет 1275 руб. на тонну труб или 40400 руб. в условиях Минского тракторного завода.

Основные разделы диссертации опубликованы в следующих статьях:

1. В.А.Гринберг, В.И.Тутов. Свойства стальной отливки при непрерывном литье. В сб. Охлаждение отливки, Минск, "Наука и техника", 1969.

2. В.А.Гринберг, В.И.Тутов. Радиационные трубы для термических печей. В сб. Охлаждение отливки, Минск, "Наука и техника", 1969.

3. В.Ф.Бевза, В.А.Гринберг, Н.А.Сенькин. Скорость литья при получении труб непрерывным намораживанием. В сб. Вопросы прочности и пластичности металлов, Минск, "Наука и техника", 1970.

4. В.И.Тутов, И.П.Прокопов, В.А.Гринберг. Непрерывное литье, "Промышленность Белоруссии", 1970, № 1.

5. Г.А.Анисович, В.И.Тутов, В.А.Гринберг. Влияние интенсивности охлаждения и условий питания на свойства отливок. В сб. Усадочные процессы в сплавах и отливках, Киев, "Наукова думка", 1970.

Основные результаты работы доложены и обсуждены:

1. На II Всесоюзном совещании по литейным свойствам сплавов (г.Киев, 1968 г.).

2. На республиканской конференции "Новое в литейном производстве" (г.Минск, 1970 г.).

3. На У научной конференции молодых ученых отделения физико-технических наук АН БССР (г.Минск, 1970 г.).

4. На научно-техническом семинаре "Новейшие достижения в ковильном литье" (г.Одесса, 1971 г.).

5. На XXV, XXVI и XXVII научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института совместно с работниками промышленности и строительства (г.Минск, 1969, 1970 и 1971 гг.).