

Изобретение относится к способу получения ленты из магнитной стали с ориентированными зернами, имеющей толщину менее 5мм и содержащей по весовому составу более 2% кремния, менее 0,1% углерода, элементы - ингибиторы вторичной рекристаллизации, причем остальное представляет собой железо, путем непрерывного литья на цилиндре или между двумя цилиндрами. Изобретение преимущественно используется в сталеплавильном производстве.

Магнитная листовая сталь с ориентированными зернами используется для изготовления магнитных цепей магнитопроводов, трансформаторов и вращающихся механизмов больших размеров. При использовании ее, например, в трансформаторах, для получения оптимальных магнитных характеристик стали, кристаллографическое направление $\langle 001 \rangle$, которое является направлением легкого намагничивания, должно быть параллельно направлению прокатки.

В известном способе производства листовой стали с ориентированными зернами, плоские слитки, получаемые непрерывной разливкой, подвергаются горячей прокатке на лентопрокатном стане, и в процессе этой операции прокатки появляются зерна GOSS с ориентацией $\{110\} \langle 001 \rangle$ согласно обозначению MILLER. При добавлении к жидкому металлу, состоящему из железа, кремния и углерода, таких веществ, как марганец, алюминий, бор, сурьма, олово, сера и/или азот образуются ингибиторы, например, MnS, AlN, BN и/или Sn и Sb, которые частично выпадают в осадок или ликвидируются в ленте, подвергаемой горячей прокатке, или выпадают в осадок в процессе дальнейшей термообработки (отжиг горячекатанной ленты и/или промежуточный отжиг между двумя холодными прокатками). При адекватных предшествующих термических циклах достаточное количество преципитата после обезуглероживания имеют размеры менее 100 нанометров. Конечный статистический отжиг в бобинах позволяет получить селективный рост зерен GOSS, возникших при горячей прокатке благодаря замедлению преципитатами нормального роста зерен, не имеющих желательной ориентации. Это явление называют вторичной рекристаллизацией, тогда как первичная рекристаллизация имеет место во время операции обезуглероживания.

Новый способ непосредственного получения тонкой ленты толщиной менее 5мм с помощью литья жидкого металла между двумя цилиндрами позволяет избежать горячей прокатки, так что зерна GOSS не могут больше, как в известных способах, зародиться в процессе горячей прокатки. Поэтому очень важно определить новые режимы литья, благоприятные для существования зерен GOSS в тонкой ленте в виде необработанной отливки.

В качестве прототипа заявляемого изобретения принят способ получения ленты из магнитной стали, преимущественно толщиной менее 5мм с весовым составом - более 2% кремния, менее 0,1% углерода, элементы-ингибиторы вторичной рекристаллизации и остальное - железо, включающий непрерывное литье на цилиндре или между двумя цилиндрами (EP №390160, кл. C21D8/12, 1990).

За прототип заявляемого изобретения принят также лист, полученный из литья ленты магнитной стали с зернами ориентацией $\{110\} \langle 001 \rangle$ (EP №390160, кл. C21D8/12, 1990).

Недостатком изобретения является то, что в процессе разлива металла предлагается контроль скорости вторичного охлаждения тонкой ленты, получаемой после затвердевания жидкого металла, причем величина этой скорости должна быть более $10^\circ\text{C}/\text{сек}$ в интервале между 1300 и 900°C , чтобы воспрепятствовать росту преципитатов-ингибиторов, что исключило бы последующую вторичную рекристаллизацию и образование зерен с ориентацией $\{110\} \langle 001 \rangle$. В патенте также уточняется, что если скорость вторичного охлаждения в интервале 1300 и 900°C слишком высокая, то столбчатая структура ленты в виде необработанной отливки имеет строение $\{100\} \langle \text{OWW} \rangle$ с количеством зерен GOSS, близким к нулю, что не дает возможности получить конечную толщину только за одну операцию холодной прокатки с коэффициентом вытяжки более 80%. Действительно, в этих условиях вторичная рекристаллизация не происходит. При соответствующей скорости вторичного охлаждения, превышающей $10^\circ\text{C}/\text{сек}$, лента в виде необработанной отливки, в которой после отвердевания произошла рекристаллизация, является изотропной, т.е. имеет произвольное строение, при этом зерна не имеют преимущественной ориентации. Вторичная рекристаллизация достигается после коэффициента вытяжки в холодном состоянии более 80%, в процессе отжига вторичной рекристаллизации.

Недостаток известного листа заключается в его неудовлетворительной микроструктуре, включающей зерна, не имеющие преимущественной ориентации и характеризующейся недостаточным количеством зерен GOSS, что является результатом несовершенства контроля скорости вторичного охлаждения в процессе затвердевания металла.

В основу заявляемого изобретения поставлена задача получения оптимальной кристаллографической ориентации зерен в металлической ленте в способе получения ленты из магнитной стали путем контроля условий затвердевания ленты, в частности, контроля температуры охлаждения поверхности цилиндров, что вызывает образование зоны закалки на поверхности ленты, контактирующей с цилиндром, и обеспечивает селективную кристаллизацию зерен GOSS при исключении вторичной термообработки.

В основу изобретения поставлена также задача улучшения микроструктуры листа путем резкого охлаждения металла при контакте с цилиндром, вызывающего закалку поверхностной зоны листа, что обеспечивает возникновение столбчатой структуры в зоне закалки и базальтовой нестолбчатой структуры с зернами GOSS в корке.

Поставленная задача достигается тем, что в способе получения ленты из магнитной стали, преимущественно толщиной менее 5мм с весовым составом - более 2% кремния, менее 0,1% углерода, элементы-ингибиторы вторичной рекристаллизации и остальное - железо, включающий непрерывное литье на цилиндре или между двумя цилиндрами, согласно изобретению, сталь подвергают резкому охлаждению путем контакта с цилиндром или с каждым из двух цилиндров, причем температуру охлаждения поверхности цилиндров поддерживают ниже 400°C с образованием зерен с ориентацией $\{110\} \langle 001 \rangle$ в поверхностной корке, на поверхности, по меньшей мере, одной зоны закалки.

При этом при отливке ленты между двумя цилиндрами, охлажденными ниже 400°C, давление между цилиндрами устанавливают менее 50 кг/мм ширины ленты, температуру поверхности цилиндра или каждого из цилиндров поддерживают ниже 250°C, коэффициент теплообмена в месте контакта цилиндр - затвердевшая корка поддерживают более $0,1 \text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек.}^\circ\text{C}$.

Кроме того, корку ленты, поверхность зоны закалки образуют по базальтовому нестолбчатому принципу, толщину слоя жидкого металла в сердцевине ленты на выходе из изложницы поддерживают меньше или равной 30% толщины ленты, содержание углерода в затвердевшей ленте поддерживают превышающим 0,01%.

Минимальную температуру, достигаемую затвердевшей коркой на выходе из изложницы, поддерживают менее 1400°C/сек, скорость естественного охлаждения затвердевшей корки поддерживают менее 100°C/сек.

Ленту подвергают, по меньшей мере, одной холодной прокатке, термообработке по обезуглероживанию, первичной рекристаллизации и конечному отжигу вторичной рекристаллизации либо отжигу после одной или каждой холодной прокатки или перед первой холодной прокаткой.

Поставленная задача достигается также тем, что лист, полученный из литья ленты магнитной стали с зернами ориентацией {110} <001>, согласно изобретения, имеет столбчатую структуру в зоне, подвергавшейся закалке, и базальтовую нестолбчатую структуру с зернами типа GOSS в корке.

Кроме того, он содержит дополнительную центральную зону с эквипаксиальной структурой.

Контроль условий отверждения в процессе литья, а не скорость вторичного охлаждения в интервале между 1300 и 900°C, является основным параметром, определяющим существование зерен GOSS в тонкой ленте, получаемой непрерывной разливкой жидкого металла между двумя цилиндрами или на одном цилиндре.

На фиг.1 показано изменение температуры поверхности ленты в контакте с цилиндрами и цикл температуры поверхностной корки на выходе из изложницы; на фиг.2 и 3 показаны в разрезе две структуры ленты на выходе из изложницы, относящиеся, соответственно, к случаю одной скорости цилиндров, при которой на выходе из изложниц получают отлитую ленту с центральной зоной в расплавленном состоянии (фиг.3) и к случаю другой скорости, более низкой, при которой на выходе из изложницы получают отлитую ленту без центральной зоны жидкого металла (фиг.2).

Согласно предлагаемому способу, контроль за условиями отвердевания позволяет получить зерна GOSS в тонкой ленте, получаемой непрерывной разливкой в случае естественного охлаждения, т.е. не прибегая к специальному вторичному охлаждению с помощью, например, распыления воды. Вторичное охлаждение может иметь место, но для другой цели, а не для решения металлургической проблемы, связанной со структурой металла. Оно может быть обусловлено, например, технологическими требованиями намотки бобин или стремлением избежать поверхностного окисления, и может быть реализовано, например, продувкой нейтрального газа.

Согласно изобретения, зерна GOSS создаются в изложнице в результате контакта расплавленного металла с цилиндрами благодаря оптимизации условий теплообмена между жидким металлом и поверхностью цилиндров, и эти зерна сохраняются под базовой плоскостью и на выходе из изложницы, не используя специальную систему вторичного охлаждения, путем контроля соответствующего параметра процесса непрерывного литья, например, скорости литья. В описанных ниже примерах, иллюстрирующих изобретение, устройства литья между двумя цилиндрами не снабжены дополнительными системами охлаждения, а затвердевшая лента охлаждается при температуре окружающего воздуха.

На фиг.1 показана температура поверхности ленты в контакте с цилиндрами во время прохождения металла между двумя цилиндрами изложницы при непрерывной разливке и цикл охлаждения поверхностной корки ленты на выходе из изложницы.

Цилиндры, охлаждаемые циркуляцией воды, у которых температура поверхности поддерживается ниже 400°C, вызывают отверждение поверхности ленты, образуя на ней зону закалки, корка которой подвергается резкому изменению температуры, показанному в виде перепада температуры в зоне I. При выходе ленты из изложницы сердцевина, имеющая температуру более высокую, чем температура зоны закалки, повышает температуру поверхностной корки (зона II). В зоне III корка подвергается естественному охлаждению в окружающем воздухе, при котором не требуется применять устройство ускоренного охлаждения, например, путем распыления воды. Кривая C1 соответствует скорости литья V1, а кривая C2 - скорости литья V2 > V1.

Фиг.2 и 3 представляют собой два схематических изображения двух структур ленты на выходе из цилиндров 1 и 2, имеющих, соответственно, с одной стороны, центральную жидкую зону 3 между двумя зонами закалки 4 и 5 (фиг.3), и с другой стороны, две прилегающие друг к другу зоны закалки 4 и 5, причем центральная зона 3 на выходе из изложницы уже является отвердевшей (фиг.2).

Наблюдения за микроструктурой ленты Fe-Si в виде необработанной отливки, полученной литьем между цилиндрами, осуществлялось на образцах таким образом, чтобы выявить зерна GOSS. Полированные образцы были подвергнуты первому воздействию разбавленной азотной кислоты, чтобы выявить границы зерен, и затем второму воздействию реактива, содержащего фтористоводородную кислоту и перекись водорода. Полученные таким образом картины коррозии были использованы для определения кристаллографических ориентации зерен и обнаружения зерен GOSS. Было найдено, что зерна GOSS располагаются в самой крайней части корки, на поверхности зоны закалки в контакте с поверхностью цилиндра. Речь идет о той части, которая отвердевает согласно базальтовому нестолбчатому принципу. Для получения зерен GOSS в необработанных отливках при окружающей температуре необходимо вызвать их образование при первом контакте с поверхностью цилиндра и сохранить их, избегая роста соседних столбчатых зерен и способствуя их росту до момента потери лентой контакта с цилиндрами на выходе из изложницы.

Как показано на фиг.2 и 3, в контакте с охлаждаемыми цилиндрами металл на поверхности ленты

подвергается быстрому охлаждению, и на выходе из изложницы корка подвергается быстрому нагреванию от сердцевины, содержащий в зависимости от условий больше или меньше жидкой стали.

Параметрами, влияющими на минимальную температуру T_{\min} , достигаемую поверхностной коркой в изложнице, являются:

- температура поверхности цилиндра, поддерживаемая менее 400°C благодаря охлаждению посредством водных каналов, теплопроводности материала, образующего поверхность цилиндра, геометрическим характеристикам поверхности цилиндра, например, шероховатости, диаметру и т.д. - изменение теплового сопротивления в месте контакта поверхности цилиндра/корка в процессе отвердевания. Чтобы сформировать зерна GOSS на поверхности зоны закалки и сохранить их до момента выхода из контакта с поверхностью цилиндра, согласно изобретения, нужно:

- чтобы температура поверхности цилиндра была ниже 400°C ;

- чтобы коэффициент теплообмена в месте контакта был больше $0,10\text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}^{\circ}\text{C}$ по всей длине дуги контакта 10.

В этих условиях минимальная температура T_{\min} , достигнутая коркой на выходе из изложницы (зона I, фиг.1) будет ниже 1400°C , а скорость естественного охлаждения ленты (зона III, фиг.1), существенно равная в корке в сердцевине, не превышает 100°C/сек .

Ниже плоскости Р, содержащей оси цилиндров (или базовой плоскости) с момента, когда лента выходит из контакта с цилиндрами отвод тепла уже не будет таким интенсивным, и распространение фронта отвердевания, согласно базальному столбчатому принципу, прекращается. Если лента образована двумя зонами закалки и центральной вязкой зоной, содержащей жидкость и зародыши эквивалентных зерен (фиг.3), то для охлаждения центральной зоны сквозь отвердевшие зоны требуется отводить скрытое тепло жидкой части, а также калории от твердой части. Так как охлаждение поверхностных корок теперь происходит только их излучением, в результате происходит нагрев поверхности. Именно на этом этапе зерна в корке, в частности, зерна GOSS, могут исчезнуть. В процессе нагрева важным параметром является время нахождения в области температур, где имеет место подвижность границ зерен. Приведем перечень факторов, влияющих на температуру нагрева и время, проведенное в области подвижности границ зерен, вызванной термическим воздействием:

- соотношение центральной зоны с эквивалентной структурой после затвердевания жидкости с общей толщиной ленты;

- начальная температура поверхностной корки, определяемая различными параметрами установки.

Наблюдения показали, что число зерен GOSS на единицу длины корки и процент зерен GOSS на поверхности изменяются в зависимости от величины в процентах центральной зоны и процентного содержания углерода в отвердевшем металле. Структуры при затвердевании были выявлены с помощью электролитического воздействия в водном растворе, содержащим 10% дисперсульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$, которое дает возможность наблюдать основные оси дендритов.

Новизна настоящего изобретения заключается в том, что было выявлено образование зерен GOSS в изложнице при первом контакте жидкости с поверхностью цилиндра.

Ограничение процентной величины центральной зоны, способной нагревать поверхностные корки, и содержания углерода является способом сохранения этих зерен. Согласно табл.1, число зерен GOSS на 1см корки и количество в % зерен GOSS на поверхности будут гораздо выше в случае, когда величина в % центральной зоны равна нулю (фиг.2) и при более высоком содержании углерода.

Соотношение между вторичной рекристаллизацией и максимальной температурой поверхности и давлением цилиндров, коэффициентом теплообмена в месте контакта цилиндр/отвердевшая корка, количеством зерен GOSS на 1см корки, количеством зерен GOSS на поверхности, в % и содержанием углерода иллюстрируется с помощью следующего опыта непосредственного литья тонкой ленты между двумя цилиндрами. В табл.2 приведен химический состав металла, массовый состав, в %.

В табл.3 приведены экспериментальные условия и структурные характеристики ленты, отлитой между двумя цилиндрами.

В табл.4 представлены различные этапы преобразования декапированной ленты.

В этих условиях была получена полная вторичная рекристаллизация, т.е. 100% зерен GOSS в конечной толщине 0,28мм. С учетом повышенного содержания углерода (0,035%) количество зерен GOSS в поверхности, в % тем не менее является довольно высоким (5,6%), тогда как величина центральной зоны, в %, превышает 10%. Было обнаружено, что зерна GOSS в поверхности сохраняются даже при величине центральной части, в % порядка 30%, если содержание углерода превышает 0,035%, при этом максимальная температура поверхности цилиндров и давление, приложенное к ленте между цилиндрами, соответственно составляют менее 400°C и 50кгс/мм, причем коэффициент теплообмена превышает $0,10\text{ кал/см}^2 \cdot \text{сек}^{\circ}\text{C}$.

Кроме того, число и размеры частиц сернистого марганца и сернистой меди в результате охлаждения ленты в спокойном окружающем воздухе обеспечивают наличие удовлетворительной ингибиторной способности. После обезуглероживания отжига многочисленные преципитаты, идентифицированные с помощью трансмиссионного электронного микроскопа, имеют сферическую форму с диаметром приблизительно от 10 до 100нм. Кроме того, хорошо известно, что ингибиторная способность может быть усилена добавкой ингибиторов в магнезию, которая используется как разделитель при отжиге, препятствуя слипанию витков бобин в процессе отжига вторичной рекристаллизации.

Изобретение может быть применимо к способам непрерывного литья тонких лент между двумя цилиндрами и на одном цилиндре для получения листов с ориентированными зернами с нормальной или высокой проницаемостью. Оно применимо независимо от того, какой используется вид замедления - сульфиды, селениды, нитриды, ликвированные элементы нормального роста зерен первичной рекристаллизации, благоприятствующего селективному росту зерен GOSS, и независимо от того, какой обработке будет после этого подвергнута лента, полученная непрерывным литьем жидкого металла на

цилиндре или между двумя цилиндрами. Эта последующая обработка может включать в себя только холодную прокатку с высоким коэффициентом вытяжки более 80% для получения листа с высокими характеристиками, или представлять собой известную обработку с двумя или более холодными прокатками с промежуточными отжигами.

Лента в виде необработанной отливки может быть подвергнута отжигу перед холодной прокаткой, в частности, с целью оптимизации размеров ингибиторов. После холодной прокатки выполняются последовательно первичная рекристаллизация и обезуглероживание. Затем финальный отжиг бобин после пропитки молочком магнезии для предотвращения склеивания витков в статической печи способствует явлению вторичной рекристаллизации, приводящему к селективному формированию зерен с ориентацией $\{110\} \langle 001 \rangle$. Условия получения ленты между двумя цилиндрами могут быть адаптированы для случая литья на одном цилиндре или при питании цилиндра жидким металлом сбоку. Зерна с ориентацией $\{110\} \langle 001 \rangle$ получают при тех же условиях, при этом давление на 1мм ширины ленты равно нулю. Тогда зерна GOSS присутствуют только на поверхности ленты в контакте с цилиндром. В табл.5 дается пример количества зерен GOSS на 1см поверхностной корки и количество зерен GOSS в процентах на единственной поверхности контакта с цилиндром, в зависимости от экспериментальных условий литья на одном цилиндре.

Таблица 1

Количество зерен GOSS в процентах на поверхности в зависимости от величины в процентах центральной зоны и от процентного содержания углерода (для случая литья между двух цилиндров)

Максимальная температура поверхности цилиндра или каждого из цилиндров	250°C	240°C	300°C
Давление цилиндров, кгс/мм ширины	10	7,5	10
Толщина ленты, мм	1,6	1,8	1,85
Длина корки, наблюдаемая в направлении литья, мм	750	850	400
Величина в процентах центральной зоны/толщина центральной зоны толщина ленты x 100, %	0	4	19,5
Процент углерода в отвердевшем металле	0,005	0,005	0,020
Число зерен GOSS на 1 см корки	1,8	0,6	3
Количество зерен GOSS на поверхности в %	2,8	1,5	8,8

Таблица 2

C	Si	S	P	Mn	Cu	Растворим. Al	N
0,035	3,22	0,02	0,005	0,035	0,187	0,001	0,005

Таблица 3

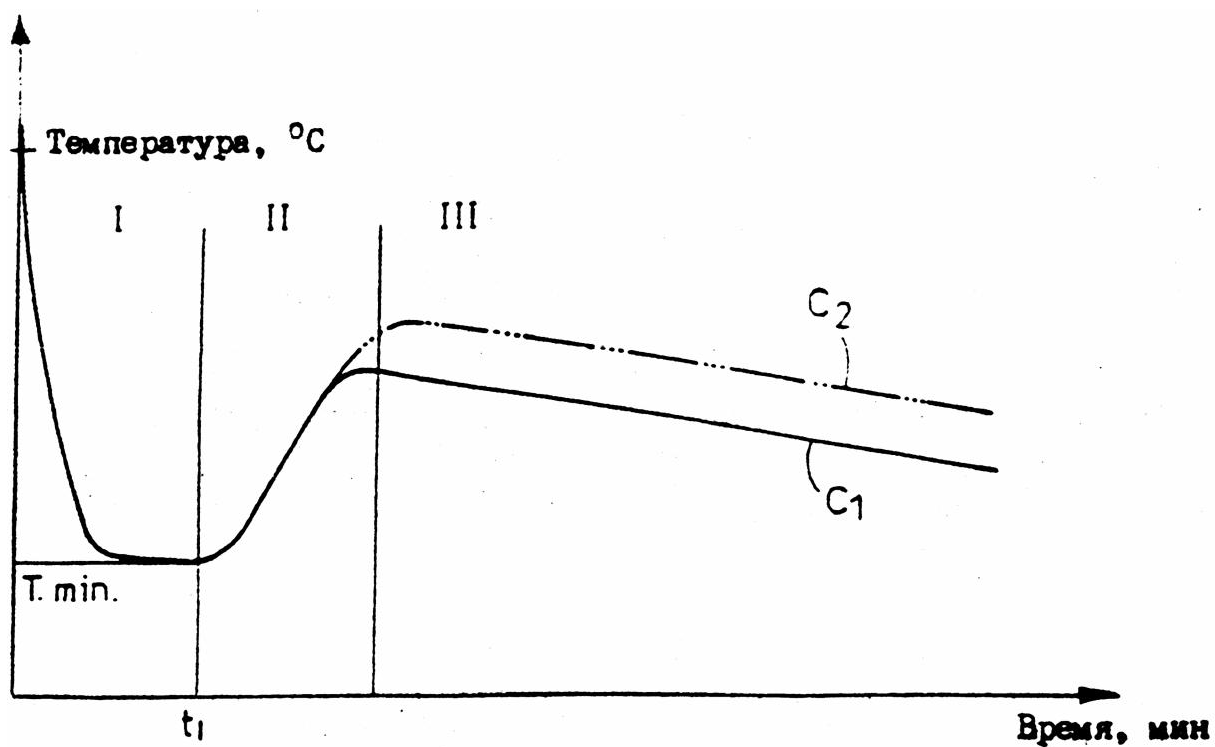
Максимальная температура поверхности каждого цилиндра	350°C
Давление цилиндров (кгс/мм ширины ленты)	18
Скорость литья (м/мин)	41
Минимальная температура, T _{min}	1120°C
Скорость охлаждения затвердевшей ленты (зона III, фиг. 1)	55°C/сер
Толщина ленты (мм)	3,1
Коэффициент теплообмена (кал/°C.см ² .сек)	0,17
Величина в % центральной зоны	13
Процент углерода в затвердевшем металле	0,035
Число зерен GOSS на 1 см корки	1,3
Количество зерен GOSS на поверхности в %	5,6

Таблица 4

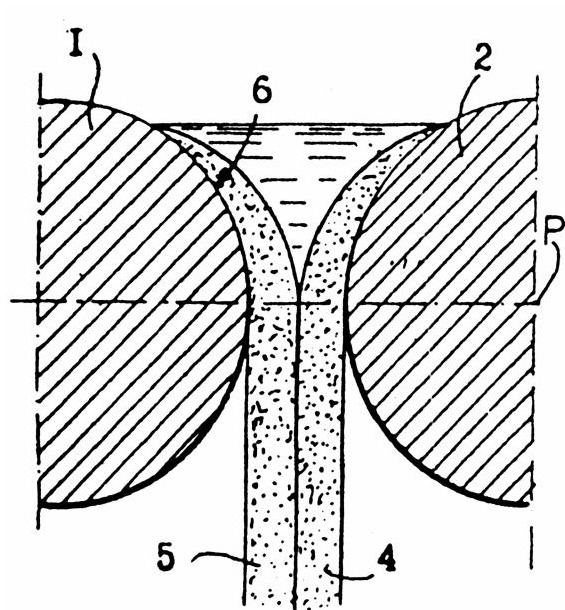
Коэффициент вытяжки первой холодной прокатки	79%
Промежуточный отжиг	980°C 1 мин 30'
Коэффициент вытяжки второй холодной прокатки	55%
Обезуглероживающий отжиг	
пропитка MgO	870°C, 3 мин
Высокотемпературный отжиг	1200°C, 20 часов

Таблица 5

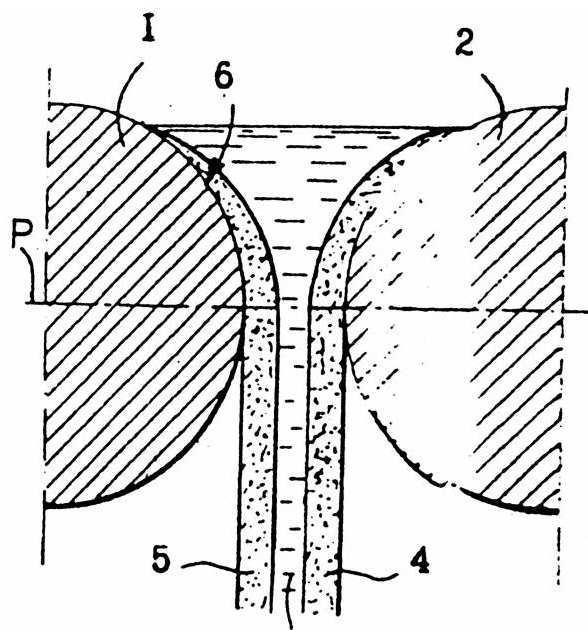
Температура поверхности цилиндра, °C	280
Скорость литья, м/мм	30,33
Толщина ленты, мм	1,38
Центральная зона в %	0
Процент углерода затвердевшего металла	0,01
Число зерен GOSS в поверхности в %	5,8



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3