



(11) (21) **EA – 960020**

(13) **A2**

(51) **6 B 22 D 27/04**

(19) Евразийское Патентное
Ведомство

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОЙ ЗАЯВКЕ

1

(21) 960020 (22) 26.04.96
(31) 19522266.0
(32) 20.06.95 (33) DE
(43) 31.12.96 Бюл. № 3
(72) Кац Эдуард Лейбович (RU), Контер
Максим Лианович (RU), Реслер Йоахим
(DE), Лубенец Владимир Платонович (RU)
(71) АББ Рисерч Лтд (CH)
(74) Матвеева Н.А., Журавлева И.В. (RU)
(54) Способ изготовления литой заготовки
и устройство для осуществления этого
способа
(57) Изобретение относится к способу
изготовления отливок в литейной форме из
сплава с направленным затвердеванием.
Литейная форма проходит от нагреваемой
камеры в охлаждающую камеру. Температу-

2

ра в нагреваемой камере при этом выше
температуры ликвидуса сплава, а темпера-
тура в охлаждающей камере ниже темпера-
туры солидуса сплава. Нагреваемая и
охлаждающая камеры отделены друг от друга
экраном, расположенным поперечно к на-
правлению прохождения литой формы с
отверстием для нее. При осуществлении
способа образуется фронт затвердевания,
ниже которого образуется отливка направ-
ленного затвердевания. Эта часть отливки,
поступающая в охлаждающую камеру, ох-
лаждается потоком инертного газа. За счет
этого при большой длительности производст-
венных циклов получают отливки, прак-
тически не имеющие дефектов. 2 н.п., 13
з.п. ф-лы, 1 фиг.

EA 960020 A2

EA 960020 A2

С помощью предлагаемого способа изготовления литой заготовки с направленным затвердеванием могут изготавливаться детали сложной формы, подверженные высоким термическим и механическим нагрузкам, например, рабочие или направляющие лопатки газовых турбин. При этом, в зависимости от условий проведения способа, направленно затвердевающие отливки могут быть выполнены в виде монокристаллов или образованы в виде столбчатых кристаллов, ориентированных в сторону предпочтительного направления. Особое значение имеет тот факт, что направленное затвердевание происходит в условиях, при которых между охлаждаемой частью литейной формы с залитым расплавленным исходным материалом и только лишь заливаемым материалом происходит интенсивный теплообмен. Тогда может образовываться зона направленно затвердевающего материала с фронтом затвердевания, который при продолжающемся отводе тепла перемещается по литейной форме с непосредственным образованием затвердевшей отливки.

Изготовление бездефектной отливки в значительной мере зависит от величины температурных градиентов на фронте затвердевания и скорости упрочнения. При незначительном температурном градиенте и высокой скорости упрочнения нельзя изготовить направленно затвердевшую отливку. И наоборот, при высоком температурном градиенте с незначительной скоростью упрочнения хотя и можно получить отливку с направленным затвердеванием, но такая отливка имеет места с нежелательными дефектами, например, расположенные цепочкой по одной оси зерна (freckles).

Изобретение исходит из способа изготовления отливки с направленным затвердеванием и из устройства для осуществления способа, описанного, например, в заявке США US-A3,532,155.

Описанный способ служит для изготовления рабочих или направляющих лопаток газовых турбин, в котором применяется вакуумируемая печь. Эта печь имеет две камеры, отделенные одна от другой водоохлаждаемой стенкой и расположенные одна над другой, верхняя из которых выполнена нагреваемой и имеет поворачивающийся плавильный тигель для расплавленного материала, например сплава на основе никеля. Нижняя камера, соединенная с этой нагреваемой камерой отверстием в водоохлаждаемой стенке, выполнена охлаждаемой и имеет водопроницаемые стенки. Проходящая через дно этой охлаждаемой камеры и через

отверстие в водоохлаждаемой стенке приводная штанга несет на себе омываемую водой охлаждаемую плиту, которая образует дно отливки, находящейся в нагревательной камере.

При проведении способа сначала в литейную форму, находящуюся в нагревательной камере, заливают расплавленный в плавильном тигеле сплав, при этом над охлаждаемой плитой, образующей дно формы, образуется узкая зона направленно затвердевшего сплава. При перемещении литейной формы вперед, в направлении охлаждаемой камеры, эта форма направляется через отверстие, предусмотренное в водоохлаждаемой стенке. Фронт затвердевания, ограничивающий зону из направленно затвердевшего сплава, смещается с образованием направленно затвердевшей отливки снизу вверх через литейную форму.

К началу процесса затвердевания достигается высокий температурный градиент и высокая скорость упрочнения, так как материал, залитый в форму, сначала поступает непосредственно на охлаждаемую плиту, а тепло, отводимое от расплава, направляется от фронта затвердевания через сравнительно тонкий слой застывшего материала с коэффициентом теплоотдачи α_{cm} к охлаждаемой плите. Если материал имеет сравнительно низкую удельную теплопроводность, то при увеличивающемся расстоянии между охлаждаемой плитой и фронтом затвердевания в увеличивающуюся массу отводится тепло через стенки литейной формы с коэффициентом теплопередачи α_{cmd} , а также от поверхности формы с коэффициентом теплопередачи α_r в более холодное окружающее пространство. Согласно закону Ньютона о теплопередаче, тепло, отводимое от отливки, определяется следующим образом:

$$q = \alpha(T - T_0),$$

где T - средняя температура отливки,

T_0 - температура окружающей среды, определяемая приблизительно водоохлаждаемыми стенками камеры охлаждения, причем

$$1/\alpha = 1/\alpha_{cm} + 1/\alpha_{cmd} + 1/\alpha_r.$$

Для больших газотурбинных лопаток из сплава на основе никеля обычно получают следующие значения коэффициентов теплопередачи:

$$\alpha_{cm} = \lambda_m / \delta_m = 816 \text{ Дж/м}^2\text{сК},$$

$$\alpha_{cmd} = \lambda_{md} / \delta_{md} = 200 \text{ Дж/м}^2\text{сК},$$

где λ_m или λ_{md} представляют собой удельную теплопередающую способность сплава или керамической литейной формы и δ_m или δ_{md}

- толщина уже затвердевшего металлического слоя (предпочтительно 30 мм) между частью стенки формы, лежащей ниже водоохлаждаемой стенки, и фронтом затвердевания или толщина стенки формы (предположительно 100 мм), и

$$\alpha_r = \sigma(\sigma_1 T_1^4 - \sigma_2 T_0^4) / (T_1 - T_0) = \\ = 130 \text{ Дж/м}^2\text{сК},$$

где σ - постоянная Стефана-Болтцманна, σ_1 , T_1 или σ_2 , T_0 - излучающая способность и температура поверхности литейной формы или абсорбционная способность и температура окружающего пространства ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0,5$; $T_1 = 1500 \text{ К}$; $T_0 = 400 \text{ К}$). Отсюда следует $\alpha = 72 \text{ Дж/м}^2\text{сК}$.

Другой способ изготовления отливки с направленным затвердеванием известен из заявки США US-A-3-3.763.926. В этом способе литейная форма, заполненная расплавленным сплавом, постепенно и непрерывно погружается в ванну расплавленного олова, нагретого до приблизительно 260°C . За счет этого обеспечивается особенно быстрый отвод тепла из литейной формы. Отливка, полученная этим способом, с направленным затвердеванием характеризуется микроструктурой с незначительной негомогенностью. При изготовлении аналогично выполненных газотурбинных лопаток таким способом можно получить приблизительно вдвое большее значение α , чем в способе по заявке США US-A-3.532.155. Для исключения нежелательных газообразующих реакций, которые могут нанести вред устройству для осуществления этого способа, этот способ нуждается, однако, в особенно точном регулировании температуры. При этом толщина стенки литейной формы должна выбираться большей, чем в способе по заявке США US-A-3.532.155.

В основу изобретения, охарактеризованного в п.1 формулы изобретения, положена задача создать способ вышеуказанного типа, с помощью которого можно изготовить простым образом отливки с направленным затвердеванием, имеющие незначительное количество дефектов, и одновременно создать устройство, которое предпочтительным образом улучшает проведение этого способа.

Способ, согласно изобретению, характеризуется тем, что он позволяет получить отливки с направленным затвердеванием и практически без дефектов, с незначительной пористостью, которые выполняются, даже при комплексном выполнении, практически без осколков. К тому же способ требует мало времени и может осуществляться также и в устройствах, согласно уровню техники, ко-

торые переналаживаются с незначительными расходами.

Изобретение поясняется более подробно на основе примера выполнения.

На чертеже схематично изображен предпочтительный пример выполнения устройства для осуществления предлагаемого способа.

Устройство имеет вакуумную камеру 2, вакуумируемую через вакуумную систему 1. Вакуумная камера 2 имеет две, отделенные одна от другой экраном (отражающим экраном) 3 и расположенные одна над другой камеры 4 и 5 и поворачивающийся плавильный тигель 6 для сплава, например сплава на основе никеля. Верхняя камера 4 выполнена нагреваемой, нижняя камера 5, соединенная с нагреваемой камерой 4 отверстием 7 в экране 3, содержит устройство для создания и подачи газового потока. Это устройство содержит полость с отверстиями или соплами 8, которые направлены внутрь на литейную форму 12, а также систему для создания газовых потоков 9. Газовые потоки, выходящие из отверстий или сопел 8, направлены преимущественно центростремительно. Приводная штанга 10, проходящая, например, через дно охлаждающей камеры 5, несет на себе, в случае необходимости, водоохлаждаемую плиту 11, образующую дно литейной формы 12.

Эта литейная форма может направляться с помощью привода, связанного с приводной штангой 10, от нагреваемой камеры 4 через отверстие 7 в охлаждаемую камеру 5.

Литейная форма 12 имеет выше охлаждающей плиты 11 тонкостенный толщиной, например, 10 мм элемент 13 из керамики, который может взять на себя функцию центра кристаллизации и/или раскручивающейся спирали (Helixstarter), способствующего образованию кристаллов. За счет подъема охлаждающей плиты 11 или насаживания на нее литейная форма 12 может открываться или закрываться. На своем верхнем конце литейная форма 12 является открытой и может заполняться через заполняющее устройство, вводимое в нагреваемую камеру 4 расплавленным сплавом 15 из плавильного тигеля 6. Литейная форма 12 в нагреваемой камере 4, окруженная электрическим нагревательным элементом 16, поддерживает часть сплава, находящегося в части литейной формы со стороны нагреваемой камеры, выше ее температуры ликвидуса.

Охлаждающая камера соединена со входом вакуумной системы 17 для удаления вдуваемого газа из вакуумной камеры 2 и для охлаждения и очистки удаляемого газа.

Для изготовления отливки с направленным затвердеванием сначала вводят литейную форму 12 путем перемещения вперед приводной штанги 10 в нагреваемую камеру 4 (на чертеже показана заштрихованной). Затем расплавленный в плавильном тигле 6 сплав заливают через заполняющее устройство 14 в литейную форму 12. При этом охлаждающая плита 11 образует выше дна формы узкую зону из направлено затвердевшего сплава (на чертеже не показана).

При перемещении литейной формы 12 вперед в охлаждающую камеру 5 керамический элемент 13 литейной формы 12 постепенно направляется через отверстие 7, выполненное в экране 3. Фронт затвердевания 19, ограничивающий зону сплава с направленным затвердеванием, перемещается снизу вверх с образованием отливки 20 с направленным затвердеванием по всей литейной форме (см.чертеж).

К началу процесса затвердевания достигаются большой температурный градиент и высокая скорость упрочнения, поскольку материал, заливаемый в форму, сначала встречается непосредственно с охлаждающей плитой, и тепло, отводимое от расплава, направляется к охлаждающей плите 11 через сравнительно тонкий слой затвердевшего материала. Когда дно литейной формы 12, образованное охлаждающей плитой 11, замеренное от нижней стороны экрана 3, на несколько миллиметров, например от 5 до 40 мм, будет выступать в охлаждаемую камеру 5, из отверстий или сопел 8 подается инертный, не реагирующий с нагреваемым материалом сжатый газ, например, благородный газ, например, гелий, или аргон, или другая инертная среда. Потоки инертного газа, выходящие из отверстий или сопел 8, ударяются о поверхность керамического элемента 13 и направляются дальше вниз, вдоль поверхности. При этом они отводят тепло q от литейной формы 12 и тем самым также от уже затвердевшей части содержимого литейной формы. В соответствии с уровнем техники по заявке США US-A-3.532.155, отводимое тепло рассчитывается следующим образом:

$$q = (T - T_0),$$

где T - температура отливки у фронта затвердевания,

T_0 - температура окружающей среды, определяемой стенкой охлаждающей камеры 5 или вакуумной камеры 2, причем

$$1/\alpha = 1/\alpha_{cm} + 1/\alpha_{cmd} + 1/\alpha_{acc},$$

при $\alpha_{acc} = \alpha_r$ (теплопередача за счет излучения) + α_{eygas} (теплопередача за счет конвекции).

Особенно высокий теплоотвод достигается также при комплексном выполнении литейной формы, если экран 3 охлаждается и/или если его отверстие 7 ограничено гибкими пальцами 21, прилегающими к литейной форме 12.

Для большой газотурбинной лопатки из сплава на основе никеля обычными являются следующие значения коэффициента теплопередачи:

$$\alpha_{cm} = \lambda_m / \delta_{md} = 816 \text{ Дж/м}^2\text{сК},$$

$$\alpha_{cmd} = \lambda_{md} / \delta_{md} = 200 \text{ Дж/м}^2\text{сК}.$$

где λ_m или λ_{md} представляют собой удельную теплопроводность сплава или керамической литейной формы и δ_m или δ_{md} - толщина уже затвердевшего металлического слоя (предположительно 30 мм) между частью стенки формы (лежащей под экраном 3) и фронтом затвердевания или толщиной стенки формы (предположительно 10 мм) и $\alpha_{acc} = 800 \text{ Дж/м}^2\text{сК}$. Отсюда, при $\alpha = 134 \text{ Дж/м}^2\text{сК}$, получается значение теплопередачи, которое соответствует тому значению, которое получается в трудно осуществляемом способе по заявке США US-A-3.763.926.

Инертный газ, вдуваемый в охлаждающую камеру 5, может удаляться из вакуумной камеры 2 с помощью вакуумной системы 17, охлаждается, фильтруется и сжатым до нескольких бар - вводится в трубопроводы 18, соединенные с отверстиями или соплами 8. Заполнение следующей литой формы расплавленным металлом может осуществляться после удаления литой формы 12 и вакуумирования вакуумной камеры 2.

Ниже указываются свойства отливок, выполненных в виде газотурбинных лопаток, изготовленных способом по патенту США US-A-3.532.155, по патенту США US-A-3.763.926 и в соответствии с изобретением. Эти попытки имели одинаковые геометрические параметры (длина каждой 20 мм) и состояли из суперсплава на основе никеля со следующими основными компонентами, вес. %: Cr 6,5; Co 9,5, Mo 0,6; W 6,5, Ta 6,5; Re 2,9; Al 5,6; Ti 1,0; Hf 0,1; Ni - остальное.

Во всех способах геометрия печи, температура нагрева и температура разливки являются идентичными.

В способе по заявке США US-A-3.532.155 и в особенности US-A-3.763.926 фронт затвердевания обычно имеет вогнутую форму. В способе, согласно изобретению, фронт

затвердевания, наоборот, имеет плоскую или выпуклую форму. В способе, согласно изобретению, легче регулировать монокристаллическое затвердевание турбинной лопатки в зоне ее лежащего внутри и лежащего снаружи концов.

Способ, согласно изобретению, совершенно очевидным образом характеризуется наряду с высокой скоростью прохождения через печь также тем, что полученные при этом отливки имеют особенно высокую

прочность на разрыв монокристалла, незначительную пористость и отсутствие дефектов. Кроме того, при проведении способа, согласно изобретению, получают отливки, не имеющие цепочки дефектов по оси зерна и расщеплений (Freckles и Slivern).

В таблице приведены сравнительные характеристики предлагаемого способа и известных способов изготовления литой заготовки.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ изготовления литой заготовки в вакуумной камере путем подачи жидкого сплава в литейную форму и перемещения вместе с нею из нагреваемой камеры в охлаждающую камеру, где сплав направленно затвердевает, причем нагреваемая камера отделена от охлаждающей камеры экраном, в котором выполнено отверстие, *отличающийся* тем, что литейную форму под экраном дополнительно охлаждают снаружи потоком газа.

2. Способ по п.1, *отличающийся* тем, что газом является инертный газ, в частности аргон или гелий.

3. Способ по пп.1 или 2, отличающийся тем, что газ подают после входа дна литейной формы в охлаждающую камеру.

4. Способ по пп. 1-3, *отличающийся* тем, что газ подают в охлаждающую камеру в направлении поверхности литейной формы и затем отводят из вакуумной камеры.

5. Способ по п.4, *отличающийся* тем, что газ отводят откачкой в направлении выхода литейной формы из вакуумной камеры.

6. Способ по пп.4 или 5, *отличающийся* тем, что отводимый газ отсасывают, охлаждают, фильтруют и после этого возвращают в охлаждающую камеру.

7. Устройство для изготовления литой заготовки в вакуумной камере, содержащее нагревательную камеру и охлаждающую камеру, отделенные одна от другой экраном, в котором выполнено отверстие для прохода литейной формы с отливаемой деталью, *отличающееся* тем, что на стороне экрана, противоположной нагреваемой камере, расположено средство для создания и подачи потока газа.

8. Устройство по п.7, *отличающееся* тем, что средство для подачи потока газа на литейную форму имеет служащие для этого сопла или отверстия.

9. Устройство по п.8, *отличающееся* тем, что отверстия являются перфорациями по меньшей мере на одной стенке.

10. Устройство по пп. 7-9, *отличающееся* тем, что средство для создания и подачи потока газа расположено кольцеобразно вокруг отверстия, предусмотренного в экране, и имеет направленные преимущественно радиально внутрь сопла или отверстия

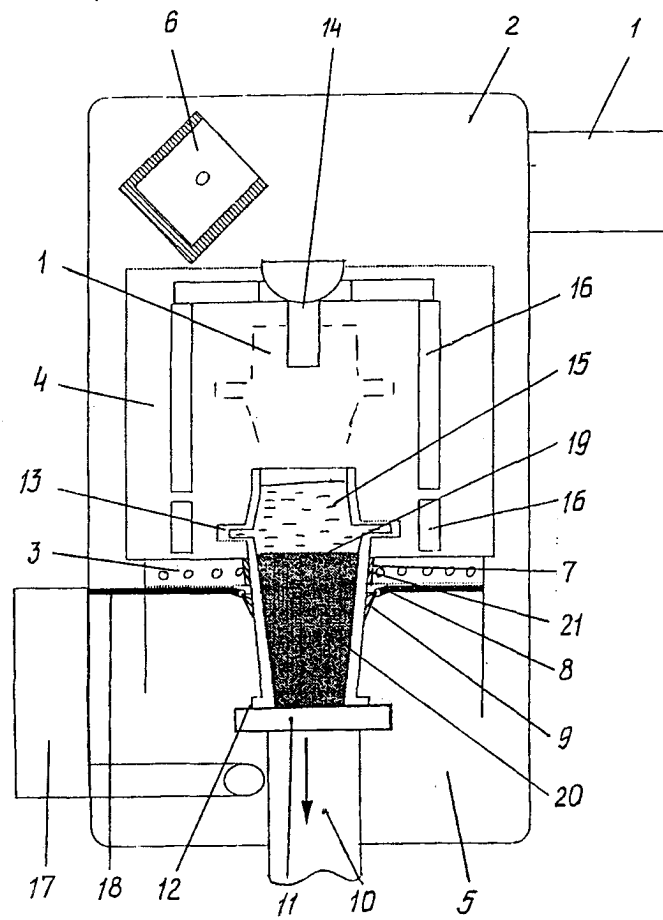
11. Устройство по пп. 7-10, *отличающееся* тем, что средства для создания потока газа являются водоохлаждаемыми.

12. Устройство по пп. 7-11, *отличающееся* тем, что оно снабжено дополнительным охлаждающим устройством, действующим на охлаждающую камеру и/или экран.

13. Устройство по п.12, *отличающееся* тем, что экран выполнен охлаждаемым и/или ограничен гибкими пальцами, направленными в отверстие, прилегающими к литейной форме.

14. Устройство по пп. 7-13, *отличающееся* тем, что охлаждающая камера соединена со входом в вакуумную систему для удаления газа из охлаждающей камеры и для охлаждения и очистки удаляемого газа, часть которого в одной из охлаждающих камер является газом, снова возвращаемым в циркуляционный контур.

15. Устройство по п.14, *отличающееся* тем, что выход из вакуумной системы соединен с трубопроводами, ведущими к соплам или отверстиям.



Способ :	US-A-3,532,155	US-A-3,763,926	Изобретение
Кол-во лопаток	8	8	4
Материал	←--суперсплав на основе никеля-->		
Скорость вытягивания	3 мм/мин полотно, 2 мм/мин ножка	←--7 мм/мин полотно--> ←--4 мм/мин ножка-->	
Ср.длина участка монокристалла перед обрывом	156 мм (обрыв монокристалла у 6-8 лопаток)	178 мм (обрыв монокристалла у 2-8 лопаток)	200 мм (без обрыва монокристалла)
Расщепление (ср. знач.) (slivers)	1,5	3	1,5
Макс.пористость (об.%)	< 0,9	< 0,5	< 0,6
Freckles	в зоне ножки	←--нет-->	