

С помощью способа изготовления литейной 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 вакуумная печь. Эта печь имеет две камеры, отделенные друг от друга водоохлаждаемой стенкой и расположенные друг над другом, 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 и 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 для изготовления отливки с направленным затвердеванием известен из заявки США US-A-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 неомогенностью. 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 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, которые переналаживаются с незначительными расходами.

Ниже изобретение поясняется более подробно на основе примера выполнения. При этом на чертеже представлен в схематическом изображении предпочтительный пример выполнения устройства для осуществления способа согласно изобретению.

Устройство, представленное на чертеже, имеет вакуумную камеру 2, вакуумируемую через вакуумную систему 1. Вакуумная камера 2 имеет две, отделенные друг от друга экраном (отражающим экраном) 3, расположенные друг над другом камеры верхнюю 4 и нижнюю 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, охлаждаемую водой 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 охлаждающую плиту 11 литейная форма 12 может открывать или перекрывать отверстие 7. На своем верхнем конце литейная форма 12 является открытой и может заполняться через заполняющее устройство 14, вводимое в нагреваемую верхнюю камеру 4 с 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 в нагреваемую камеру 4 путем перемещения вверх приводной штанги 10 (на чертеже показана пунктиром). Затем расплавленный в плавильном тигеле 6 сплав заливают через заполняющее устройство 14 в литейную форму 12. При этом под воздействием охлаждающей плиты 11 образуется выше дна формы узкая зона из направленно затвердевшего сплава (на чертеже не показана).

При перемещении литейной формы 12 вниз в охлаждающую камеру 5 керамический элемент 13 литейной формы 12 также постепенно перемещается через отверстие 7. Фронт затвердевания 19, ограничивающий зону сплава с направленным затвердеванием, перемещается по литейной форме снизу вверх с образованием отливки 20 с направленным затвердеванием по всей литейной форме. 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, гелий или аргон, или другая инертная среда. Поток инертного газа, выходящий из отверстий или сопел 8, ударяется о поверхность керамического элемента 13 и направляется 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: $q = \alpha(T - T_0)$, где T - температура отливки у фронта затвердевания и 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_{cylgas} (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

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

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

где λ_m или λ_{md} представляют собой удельную 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 литейной формы расплавленным металлом может осуществляться после удаления литейной 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 отливки 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.

Способ	US-A-3,532,155	US-A-3,763,926	Предложенное изобретение
Количество 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	
Средняя 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(среднее значение) (slivers)	1,5	3	1,5
Макс. Пористость, об. %	<0,9	<0,5	< 0,6
Freckles	в зоне ножки	нет	

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 по 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)

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ изготовления литевой заготовки в вакуумной камере (2) 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 (3) дополнительно охлаждают снаружи потоком газа.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что в качестве газа применяют 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 (5) 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 (2).

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 литевой заготовки в вакуумной камере, содержащее нагревательную камеру и охлаждающую камеру, отделенные друг от друга 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 создания и подачи потока газа на литейную

форму выполнено в виде сопла или отверстия.

9. Устройство по п. 8, отличающееся тем, что отверстие выполнено перфорированными по меньшей мере на одной стенке.

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

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

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

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

14. Устройство по пп. 7-13, отличающееся тем, что охлаждающая камера соединена со входом вакуумной системы для удаления, охлаждения и очистки газа, часть которого снова возвращается в циркуляционный контур.

15. Устройство по п. 14, отличающееся тем, что выход вакуумной системы посредством трубопровода соединен с соплами или отверстиями.

