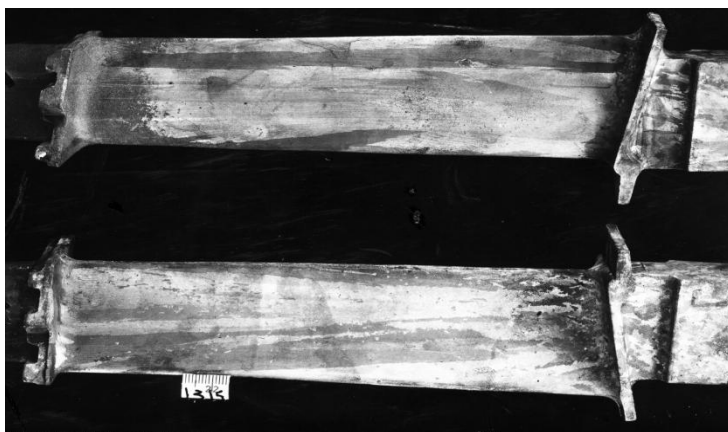


Лекция 4. Метод литья с направленной кристаллизацией. Основные технологические схемы процесса литья. Оборудование для производства отливок с НК. Методы расчета технологических параметров литья. Методы и возможности управления структурой и свойствами сплавов. Производство монокристаллитных отливок. Схемы технологического процесса литья. Расчет основных технологических параметров. Установки для изготовления отливок методом НК. Области применения и свойства заготовок с ориентированной и монокристаллитной структурами.

Суспензионное литье. Особенности структуры сплавов, управление изменением структуры сплавов. Схемы процесса, расчет основных технологических параметров литья. Электрошлаковое литье. Схемы технологического процесса литья, возможности управления структурой и свойствами сплавов. Методы расчета основных параметров технологии литья.

Начиная с середины семидесятых годов, для повышения эксплуатационных свойств изделий и, прежде всего, рабочих лопаток ГТД из жаропрочных сплавов стали применять метод литья с направленной кристаллизацией. Сущность его заключается в том, что расплав заливается в специальную, нагретую до температуры ликвидуса сплава форму, в которой обеспечивается односторонний теплоотвод, что позволяет получить отливку с вытянутыми столбчатыми зернами или же даже монокристаллитную, состоящую из одного зерна.

При изготовлении рабочих лопаток стремятся к тому, чтобы кристаллы затвердевшего металла были ориентированы вдоль оси лопатки (рис.), то есть вдоль направления действующих центробежных сил, что повышает жаропрочность, пластичность, усталостную прочность, а также ударную вязкость в указанном направлении, прежде всего, за счет устранения границ зерен перпендикулярных оси главных напряжений и снижения количества усадочных дефектов в отливке.



Отливки, полученные методом литья с направленной кристаллизацией

Сравнительная характеристика свойств отливок, полученных различными методами литья с направленной кристаллизацией, приведена в табл.

Совершенно очевидно, что столбчатую и тем более монокристаллитную структуру целесообразно иметь только в таких отливках, для которых это экономически целесообразно, так как затраты на их производство возрастают в несколько раз, по сравнению со способом литья по выплавляемым моделям.

Таблица - Свойства некоторых жаропрочных сплавов с различной структурой

Способ изготовления отливки	Сплав	Кратковременная прочность			Длительная прочность			
		σ_B , МПа	δ , %	φ , %	t , °C	σ , МПа	τ , ч	δ , %
По выплавляемым моделям (равноосная структура)								
	ЖС6К	1000	3,5	7,5	975	210	60	2,5
	ЖС6У	1005	3,2	8,0	975	230	62	2,2
	MARM200	990	3,5	7,8	760	630	100	2,0
Направленная кристаллизация (столбчатая структура)								
через форму (снизу)	ЖС6У	890	3,6	4,8	975	260	64	27,0
на кристаллизатор (снизу)	MARM200	-	-	-	760	630	350	9,8
вытягивание из расплава (сверху)	ЖС6К	950	7,6	8,5	975	230	58	12,4
на кристаллизатор (сверху)	MARM200	-	-	-	760	630	320	10,2
монокристаллитная	MARM200	940	4,5	8,7	760	700	1900	14,3

Впервые метод направленной кристаллизации был предложен А.С. Лавровым, которому удалось путем постепенного погружения тонкостенной изложницы с расплавом в воду получить литую сталь почти такой же плотности, что и кованная, причем усадочная раковина расположена была в самой верхней части слитка, подобные эксперименты на никелевых жаропрочных сплавах были проведены Ферснайдером и Гуардом.

Довольно широкую известность получил метод вытягивания профилей из расплава, разработанный А.В. Степановым. Изделия, полученные вытягиванием, в большинстве случаев имели волокнистое строение, а также отличались высокими механическими свойствами.

В настоящее время в рамках метода разработано большое количество способов литья с направленной кристаллизацией, которые отличаются:

- по направлению кристаллизации расплава: сверху или снизу;
- по способу отвода теплоты от отливки: водоохлаждаемый кристаллизатор, обдув отливки воздухом, погружение в расплав легкоплавкого металла или соли;
- по конструкции формы: с непосредственным контактом расплава с поверхностью кристаллизатора или с охлаждением через форму;
- по способу заполнения полости формы расплавом: обычная заливка или погружение формы в расплав;
- по способу управления процессом кристаллизации: регулирование нагрева формы, изменение скорости вытягивания формы из зоны действия печи подогрева, воздействие электрическим током на жидкий металл и т.д.

Схемы процесса направленной кристаллизации. Большинство способов получения отливок по методу литья с направленной кристаллизацией базируются на методе Бриджмена-Стокбаргера, согласно которому процесс направленной кристаллизации может осу-

ществляться за счет последовательного снижения мощности, выключения отдельных секций нагревателя или путем вытягивания формы из зоны действия нагревателя.

Направленная кристаллизация за счет снижения мощности нагревателя. Данный метод был разработан в США, и с его помощью были получены первые турбинные лопатки. Литейная форма 1, рассчитанная на получение сразу нескольких отливок, устанавливается (рис.4.2) в нагревателе 2 на водоохлаждаемой плите холодильника 3 и закрепляется на нем с помощью специального приспособления 4. Так как форма для увеличения теплоотвода от металла изготавливается с открытым дном, то держатели обеспечивают ее плотный контакт с холодильником, препятствуя вытеканию расплава по разъему.

После вакуумирования рабочего объема установки включается нагреватель, имеющий две отдельно управляемые секции, и литейная форма разогревается до температуры на $100 \dots 150^\circ\text{C}$ выше ликвидуса сплава. В это время в порционной печи готовится расплав. Режим заливки подбирается таким образом, чтобы расплав в момент заполнения формы имел близкую с ней температуру. Сразу после заливки нижняя секция нагревателя выключается, а на верхней начинается плавное снижение мощности. Температура формы при нагреве и в процессе направленной кристаллизации контролируется с помощью термопар 5, установленных на разных уровнях формы.

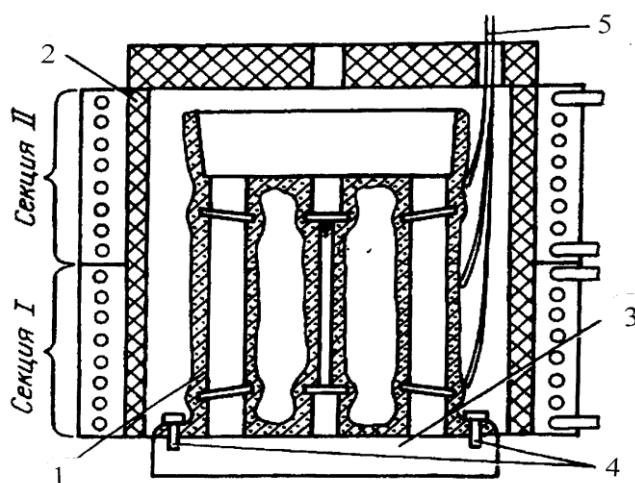


Рис.4.2. Схема теплового узла для направленной кристаллизации путем снижения мощности

При непосредственном контакте расплава с водоохлаждаемым медным холодильником происходит интенсивное охлаждение тонкого слоя металла. В результате этого в нем образуется мелкая равноосная структура, из которой затем в результате конкурентного роста происходит оттеснение тех зерен, ориентация которых удалена от кристаллографического направления $[001]$, и формируется столбчатая структура направленных зерен $1 \dots 5$ мм в поперечнике. Формирование такой структуры проводится в отдельной стартовой полости, расположенной в нижней части формы, а затем текстурированная структура прорастает в полость отливки. Таким образом, процесс направленной кристаллизации происходит в два этапа: образование столбчатой структуры и ее частичный рост под непосредственным воздействием холодильника и рост столбчатых зерен за счет снижения мощности верхней секции нагревателя.

Преимуществом этого способа получения отливок являются простота конструкции установки и отсутствие в тепловом узле каких-либо движущихся деталей.

Экзотермический способ направленной кристаллизации. Схема конструкции изложницы для направленной кристаллизации представлена на рис.4.3. Вокруг литейной формы 1 создается прослойка из экзотермической смеси 2, причем толщина этой прослойки увеличивается от основания формы к ее верхней части. Экзотермическая смесь накрыта слоем керамики 3, который является тепловым экраном. Литейная форма без дна устанавливается на водоохлаждаемый кристаллизатор 4. Для предотвращения излишнего охлаждения расплава после заливки в прибыльной части формы на открытую поверхность металла дополнительно насыпается теплоизолирующая засыпка 5. Поскольку толщина экзотермической прослойки к прибыльной части слитка увеличивается, то в соответствии с этим время горения и количество тепла, отдаваемое расплаву, будет возрастать по высоте отливки. Иначе говоря, по высоте отливки создается аксиальный температурный градиент, в котором и происходит направленная кристаллизация.

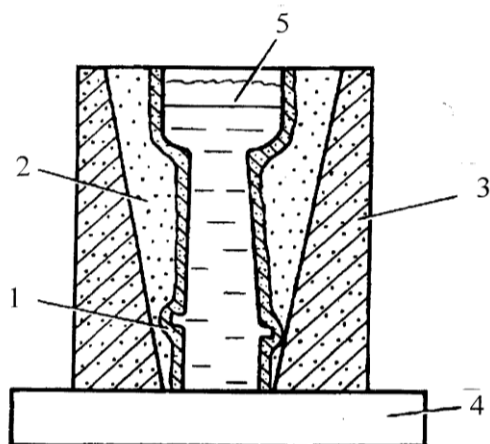


Рис.4.3. Схема изложницы для направленной кристаллизации с применением экзотермической смеси

Основным преимуществом данного метода является его простота и низкая стоимость установки.

Основным недостатком рассмотренных выше методов является то, что они не обеспечивают надежного формирования направленной структуры прежде всего из-за низких скоростей роста и температурных градиентов на фронте кристаллизации. Теплоотвод осуществляется преимущественно от холодильника, и по мере увеличения длины закристаллизовавшейся части слитка скорость роста замедляется.

Направленная кристаллизация путем вытягивания формы из нагревателя. Данный метод является в настоящее время основным для получения отливок с направленной и монокристаллитной структурами.

На рис.4.4 представлена схема установки для осуществления направленной кристаллизации этим методом. Литейная форма 1 помещается в нагреватель установки на медном водоохлаждаемом кристаллизаторе 3 и закрепляется на нем специальным креплением 4. Необходимо отметить, что существуют две разновидности этого метода: в первом случае используется форма без дна, то есть осуществляется непосредственный контакт металла с холодильником, во втором случае форма имеет дно, что практически предотвращает возмож-

ность ухода металла по разъему, но и кристаллизация происходит при охлаждении через форму.

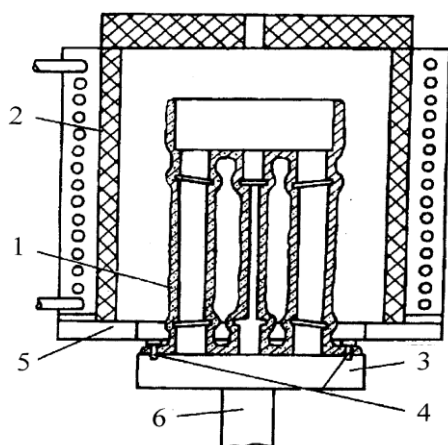


Рис.4.4. Схема установки для направленной кристаллизации методом вытягивания из нагревателя

Литейная форма разогревается в вакууме глубиной 0,133 Па до температуры на 100 ... 150 °С выше ликвидуса сплава, после чего из порционной печи происходит заливка сплава. Вначале кристаллизация происходит или на холодильнике или на нижней поверхности формы, а в дальнейшем осуществляется радиационный теплоотвод от стенок формы, которая с помощью механизма 6 постепенно вытягивается из нагревателя вместе с холодильником. Для разделения зоны нагрева и охлаждения служит тепловой экран 5, расположенный у нижнего среза нагревателя.

При кристаллизации расплава в форме без дна структура отливки получается состоящей из большого числа вытянутых столбчатых зерен диаметром 1 ... 5 мм, образующихся в результате жесткого конкурентного отбора в нижней стартовой зоне формы.

Второй способ проще, безопаснее, однако затвердевание отливки происходит при этом значительно медленнее, так как теплоотвод осуществляется через слой керамики и зазор, возникающий между неровной поверхностью формы и кристаллизатором. Важно отметить, что величина зазора зависит от многих факторов, и учесть ее изменение при выборе скорости кристаллизации бывает очень трудно. Из-за малого температурного градиента невозможно глубокое переохлаждение тонкой придонной части расплава, в результате на нижней поверхности формы образуется несколько крупных зерен (от 1 до 10 на 1 см²). Эти зерна также имеют произвольную ориентировку, и между ними в процессе роста происходит конкурентный отбор. Однако подавление "Лидером" более слабого конкурента требует в данном случае немалого времени, так как ему необходимо перекрыть вторичными ветвями детритов значительную поверхность фронта кристаллизации. Поэтому достаточно часто сильно разориентированные (до 30° и более) зерна сосуществуют по всей длине отливки, или наблюдается вытеснение одного зерна другим на значительном расстоянии от основания. В этом случае межзеренная граница выходит на боковую кромку отливки. При наличии крупных зерен их количество и ориентация в партии отливок чрезвычайно разнообразны. Отрицательное влияние такой структуры будет проявляться при эксплуатации изделия в условиях термочередов, когда на границах зерен из-за анизотропии свойств будут достаточно быстро появляться трещины, приводящие к его разрушению.

При направленной кристаллизации важное значение имеет строгое разделение зон нагрева и охлаждения. В реальных условиях этого добиться весьма трудно, так как тепловое

излучение от нагревателя всегда попадает на кристаллизующуюся часть слитка, что вызывает понижение аксиального градиента температур. Для разделения зон нагрева и охлаждения применяют различного рода тепловые экраны, устанавливаемые на нижнем срезе нагревателя. В некоторых случаях экран – диафрагма представляет собой молибденовую пластину толщиной 20 ... 30 мм. Широкое распространение получили пустотелые коробчатые экраны из графита, заполненные графитовым войлоком, а также водоохлаждаемые экраны в виде кольца. Однако при кристаллизации отливок сложной формы, например лопаток турбины ГТД, трудно добиться эффективного разделения зон нагрева и охлаждения, так как сечение и конфигурация экрана остаются постоянным, а сечение и конфигурация отливок изменяются по высоте.

Направленная кристаллизация с охлаждением в расплавленном теплоносителе (высокоскоростная направленная кристаллизация). В предыдущем способе получения отливок отвод теплоты от затвердевшей отливки осуществляется за счет теплопроводности через кристаллизатор и излучением от наружной поверхности, вышедшей из нагревателя формы на холодные стенки камеры печи. С увеличением высоты закристаллизовавшейся части слитка тепловое сопротивление повышается, и теплосъем холодильником уменьшается, таким образом, примерно на высоте 70 мм от поверхности кристаллизатора отливка будет охлаждаться исключительно излучением в вакуум с боковой поверхности формы.

Теплоотдачу с поверхности можно интенсифицировать, погружая форму в расплав теплоносителя, в качестве которого обычно используются металлические расплавы, позволяющие получать значения коэффициента теплоотдачи α до 100000 Вт/(м²К) вместо 100 Вт/(м²К) при теплоотдаче излучением.

Схема установки для направленной кристаллизации с охлаждением в расплавленном теплоносителе представлена на рис.4.5. В нагревателе 1 на подвижной подставке 4 установлена литейная форма 3. После нагрева формы до требуемой температуры и заливки металла процесс направленной кристаллизации осуществляется погружением формы в расплавленный теплоноситель 2.

Для исключения перегрева жидкометаллического теплоносителя в верхней части ванны установлен кольцевой водоохлаждаемый холодильник 5, а в основании ванны – нагреватель для предварительного расплавления теплоносителя.

Применяемые в качестве жидкометаллического теплоносителя расплавы металлов должны иметь:

- низкую температуру плавления;
- низкое давление паров в вакууме при температуре контакта с формой и высокую температуру кипения;
- высокую теплопроводность и теплоемкость;
- инертность к материалу ванны, формы и жаропрочному сплаву при случайном попадании его в ванную с теплоносителем.

Этим требованиям в наибольшей степени отвечают расплавы олова и алюминия. Олово обеспечивает получение более высоких температурных градиентов, вследствие низкой температуры плавления, однако это достаточно дорогой металл.

Алюминий более дешевый, безвредный для сплавов типа ЖС металл, однако он обладает высокой активностью и для него трудно подобрать материал для ванны, а также ввиду более высокой температуры плавления он позволяет получить меньшие температурные градиенты, а, следовательно, и скорости кристаллизации.

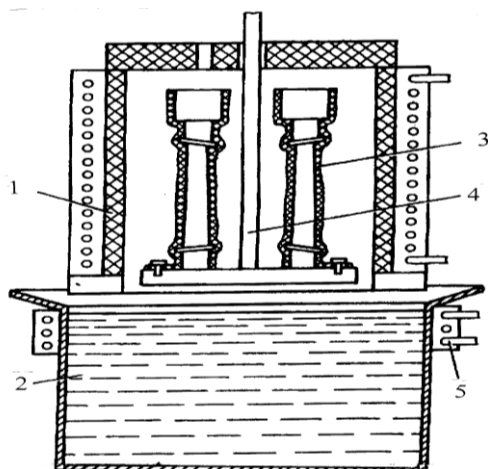


Рис.4.5. Схема установки для направленной кристаллизации с охлаждением в расплаве теплоносителя

Известны также конструкции установок, где охлаждение формы происходит в псевдокипящем слое порошковой керамики, например двуокиси алюминия, создаваемого потоком инертного газа аргона.

Направленная кристаллизация с охлаждением сверху. Основной недостаток, присущий методу направленной кристаллизации при непосредственном контакте расплава с кристаллизатором, вероятность ухода металла по разьему формы можно устранить при использовании затвердевания сверху.

На рис.4.6 показана схема такой установки. Оболочковая форма 3, находящаяся в печи 4, прокаливается до температуры выше ликвидуса сплава и заливается сплавом. Кристаллизатор 2 подводится к верхней части формы, которая начинает вытягиваться вверх. Питание отливки происходит от стояка, который кристаллизуется позднее благодаря наличию специального устройства для подогрева 1.

Направленная кристаллизация при вытягивании формы из расплава. На рис.4.7 изображена схема установки для направленной кристаллизации путем погружения формы 2 в расплав 1.

Заполнение формы при таком способе литья происходит через специальный питатель, находящийся в нижней части литейной формы. В момент касания жидкого металла с кристаллизатором 3, подводимым к верхней части формы, начинается ее вытягивание вверх из тигля 4 с расплавом жаропрочного сплава с помощью специального устройства 5.

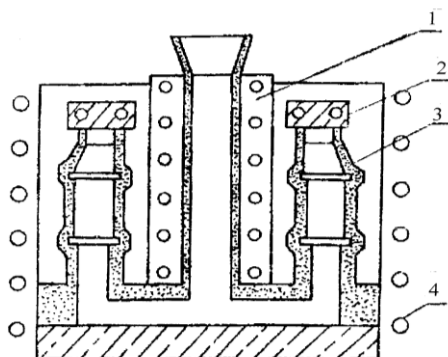


Рис.4.6. Схема установки для получения отливок

с кристаллизацией сверху

Кристаллизация идет сверху вниз. К преимуществам данного способа литья относится его простота, очень высокий, до 95 % коэффициент использования металла за счет значительного сокращения массы литниково-питающей системы, высокая производительность и низкая энергоемкость установки, вследствие отсутствия печи подогрева формы (ее роль выполняет сам расплав).

Основным недостатком данного способа литья является постепенное загрязнение жаропрочного сплава, находящегося в тигле, примесями при его взаимодействии с поверхностью формы в процессе эксплуатации установки.

Конструктивные особенности установок для направленной кристаллизации

Установка периодического действия ИИСВ-0,01-НФ. Это наиболее простая по конструкции опытно-промышленная установка (рис.4.8) для изготовления до 80 лопаток в сутки из жаропрочных сплавов. В ней использован принцип вытягивания формы из нагревателя на медном водоохлаждаемом кристаллизаторе.

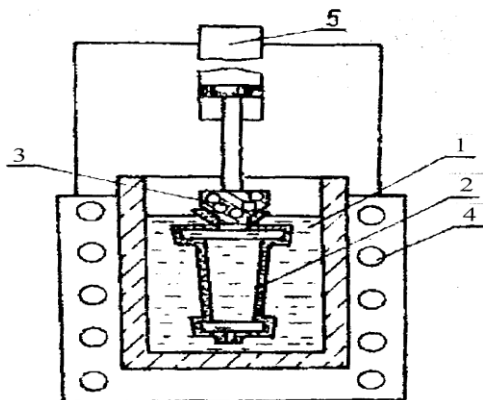


Рис.4.7. Схема установки для получения отливок вытягиванием из расплава

Камера плавления 1 выполнена в виде цилиндра, который с передней стороны наглухо закрыт сферической крышкой, а с задней стороны к нему подсоединяется подвижная часть электропечи 6 с откатной крышкой. Прямоугольные патрубки с обеих сторон через вакуумные затворы 7 соединены с камерами загрузки 2 и выгрузки 3 форм. Верхняя корзина служит для загрузки шихты в плавильную печь. Она снабжена несколькими смотровыми окнами и устройством для измерения температуры.

В рабочем пространстве камеры размещены плавильная печь 9 и индукционный нагреватель 10. Плавильная печь установлена на подвижной задней части камеры, а нагревательная – на прямоугольном патрубке. Механизмы перемещения форм расположены в боковых камерах и представляют собой тележки 4, движущиеся от винтового механизма по направляющим.

Рабочий цикл печи начинается с загрузки формы в левую боковую камеру, при этом рабочая камера находится под вакуумом 0,133 Па. После откачки вакуума из боковой камеры открывается технологический затвор, и форма на тележке поступает на опорный стол в рабочую камеру. Затем тележка возвращается на место, затвор закрывается, и загрузочная камера открывается для ввода очередной формы. Для ввода формы в нагревательную печь включа-

ется механизм перемещения опорного стола. В нижней части форма нагревается до температуры, превышающей на $40 \dots 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ температуру начала кристаллизации сплава. Температура формы в верхней части выше и обеспечивает осевой температурный градиент в расплаве, который охраняет растущий монокристалл от зарождения посторонних кристаллов над фронтом роста и от стенок формы.

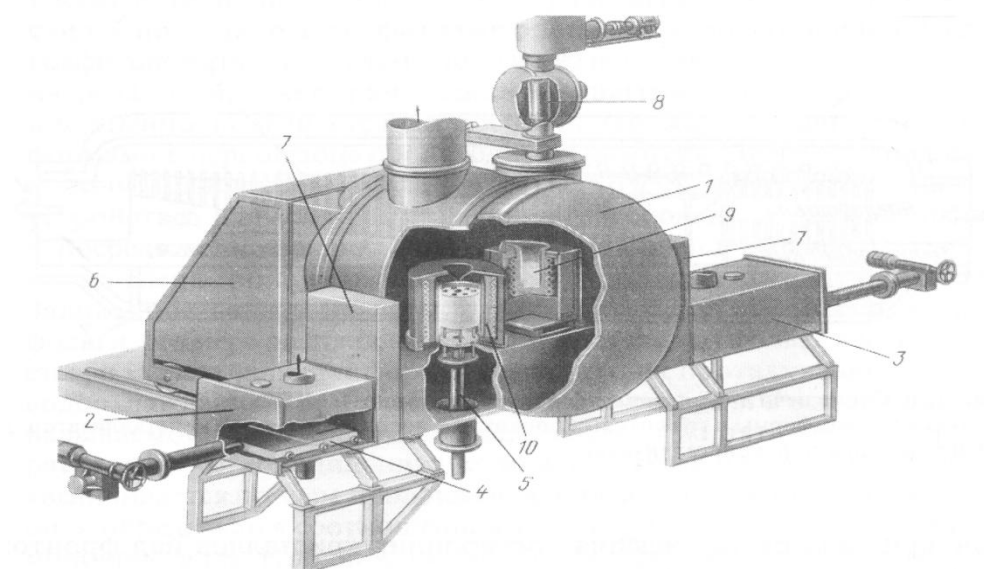


Рис.4.8. Общий вид установки для направленной кристаллизации ИИСВ-0,01-НФ

К концу нагрева формы шихта, своевременно поданная через верхнюю вспомогательную камеру в плавильную печь, расплавляется и по достижении заданной температуры расплав заливается в форму. После слива металла индукционная электропечь при обратном ходе загружается очередной шихтой и возвращается в исходное положение для следующего цикла.

Процесс зарождения кристалла и его формирование в стартовой полости формы осуществляется путем программированного подведения холодильника ко дну формы, когда образующийся монокристалл выводится над стартовой поверхностью в основную полость формы, где и формируется собственно изделие.

Для осуществления процесса кристаллизации по всей высоте формы она выводится на холодильник вместе с опорным столом из нагревательной печи в холодную зону.

Установка для направленной кристаллизации проходного типа ПМП-2. В отличие от традиционных установок с вертикальной камерой кристаллизации в печи ПМП-2 (рис.4.9) использована горизонтальная камера, и тепловой фронт расположен под углом α относительно направления перемещения формы.

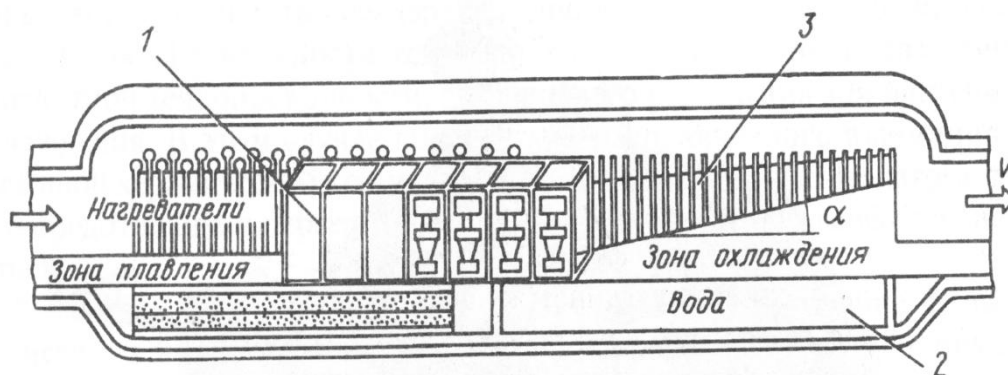


Рис.4.9. Схема печи для направленной кристаллизации ПМП-2

Оболочковую форму помещают в графитовые опоки 1 с опорным наполнителем из графитовой крошки. Затем опоки через шлюзовую камеру подают в зону нагрева печи с четырьмя секциями нагревателей, где температура постепенно повышается до 1500 °С. По мере продвижения опок с формами в первой зоне происходит их разогрев, далее опоки попадают в зону плавки. В печи ПМП-2 отсутствуют высокочастотное устройство для плавки шихтовой заготовки, и металл плавится непосредственно в самой форме. Для этой цели в верхней части формы изготовлена приемная чаша, куда помещают мерную заготовку. Заливочное отверстие для предотвращения преждевременного попадания металла в форму перекрывается несколькими слоями никелевой фольги. По мере расплавления мерной заготовки фольга постепенно расплавляется, и металл заливает форму, после чего ее проталкивают на медный водоохлаждаемый кристаллизатор 2. Нагреватель 3 этой части печи, называемой зоной кристаллизации, состоит из пяти секций, при этом расстояние от холодильника до нижнего среза нагревателя постоянно увеличивается по мере продвижения опок в печи. Скорость перемещения опок определяется соотношением

$$w_{\phi} = w_{кр} \operatorname{ctg} \alpha,$$

где $w_{кр}$ — скорость роста кристалла.

Продвижение всех опок с формами осуществляется через определенные промежутки времени, называемые интервалами толкания. Обычно его величина находится в пределах 8 ... 12 мин. Таким образом, средняя производительность печи составляет 6 блоков в час.

Установка для высокоскоростной направленной кристаллизации УВНК-8П. В этой установке полунепрерывного действия использовано охлаждение в жидкометаллическом теплоносителе — расплавленном алюминии (рис.4.10). В кристаллизационной камере 1 расположены чугунная ванна 2 с расплавленным алюминием и двухзонный нагреватель сопротивления 3 для подогрева форм. Установка снабжена автономной печью 5 для плавления шихтовой заготовки. Механизм 7 позволяет вертикально перемещать подвеску 6 вместе с формой 4. Одновременно можно кристаллизовать два блока по 6 лопаток в каждом, то есть производительность составляет примерно 180 лопаток в сутки.

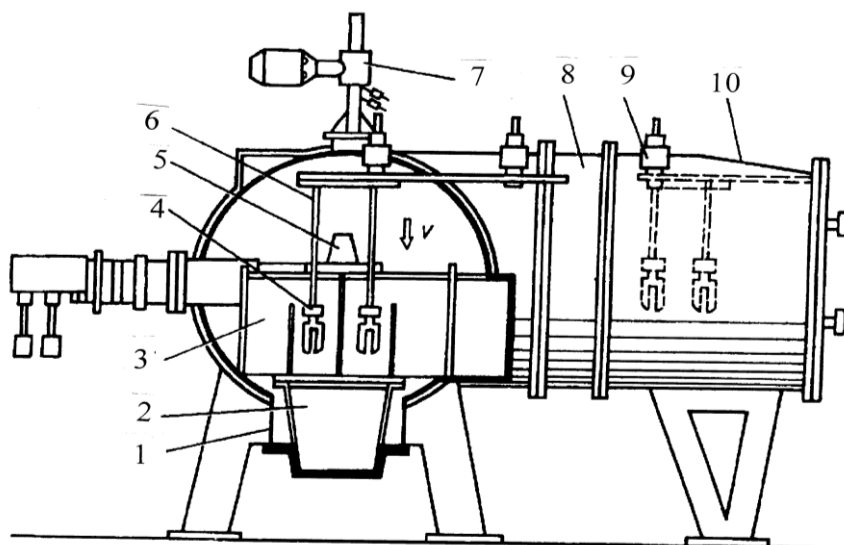


Рис.4.10. Схема установки для высокоскоростной направленной кристаллизации УВНК-8П

Вакуумный затвор 8 отсекает шлюзовую камеру от основной установки. С помощью механизма горизонтального перемещения 9 формы подаются из шлюза в кристаллизационную печь без развакуумирования всей установки. Печь подогрева формы состоит из двух отдельно управляемых нагревателей - верхнего, в виде прямоугольных графитовых пластин, и нижнего, расположенного над алюминиевой ванной. Наличие двух нагревателей позволяет создать оптимальное распределение температур по высоте литейной формы.

Процесс направленной кристаллизации происходит следующим образом. Два литейных блока на молибденовой подвеске помещают в камеру загрузки. После ее вакуумирования формы перемещают в рабочую камеру по специальным направляющим и затем соединяют с верхним штоком установки, с помощью которого блоки форм устанавливаются в печи подогрева форм на требуемой высоте от нижнего обреза нагревателя. После разогрева формы до требуемой температуры и слива металла формы опускают с регулируемой скоростью в расплавленный алюминий. На заключительной стадии направленной кристаллизации, то есть после полного погружения формы в расплав алюминия, нагреватель выключается, блоки форм поднимают в нагреватель, а затем выводят в шлюзовую камеру.

Монокристаллитное литье. Современные методы экспериментального теоретического и компьютерного моделирования литейных процессов

Монокристаллитные отливки из никелевых жаропрочных сплавов получают в основном методом направленной кристаллизации (способ Бриджмена-Стокбаргера). Тигель или литейная форма с предварительно залитым расплавом постепенно перемещается в температурном поле нагревателя из горячей зоны в зону охлаждения. Граница, на которой происходит фазовый переход расплав-кристалл, называется фронтом кристаллизации. Основными параметрами, характеризующими процесс направленной кристаллизации, являются осевой температурный градиент на фронте кристаллизации G_z и скорость перемещения фронта кристаллизации R .

Отношение величин G_z/R определяет тип формирующейся структуры монокристалла: структура с микроскопически плоским фронтом роста, ячеистая, дендритная, ячеисто-дендритная. Последний тип структуры наиболее характерен для отливок из жаропрочных никелевых сплавов, получаемых на промышленных установках. Произведение величин G_z на

R определяет дисперсность всех структурных составляющих сплава, которая возрастает с увеличением этой величины.

Оптимальные условия для получения монокристаллитной отливки создаются в том случае, когда в установке обеспечиваются:

- плоский фронт кристаллизации в макроскопическом масштабе;
- сохранение положения фронта кристаллизации относительно нагревателя неизменным для всего процесса.

Выполнение этих требований достигается, если $G_z > G_R$, где G_R – радиальные температурные градиенты, а скорость перемещения фронта кристаллизации R равна скорости вытягивания формы w из нагревателя, то есть $w = R$.

В мировой практике существуют две промышленные технологии получения монокристаллитных лопаток для газотурбинных двигателей, отличающиеся друг от друга способом зарождения монокристаллитной структуры.

1) Технология, разработанная американской фирмой Pratt and Whitney, которая основана на конкурентном росте столбчатых зерен, при котором монокристаллитная структура лопатки формируется от одного столбчатого зерна ориентации [001], выбранного из множества зародившихся на холодильнике зерен с помощью кристаллоотборника специальной конструкции. Такая технология позволяет получать отливки только с аксиальной ориентацией близкой к [001], и произвольной азимутальной ориентацией, т.е. кристаллографическая ориентация в поперечном направлении не может быть регламентирована.

2) Технология, разработанная ВИАМ, основанная на том, что монокристаллитная структура передается по телу лопатки от специально подготовленной затравки практически любой требуемой аксиальной ориентации, при этом азимутальная ориентация может быть задана в пределах, допустимых законами кристаллографии.

Получение монокристаллов на основе конкурентного роста столбчатых зерен. Данный способ получения отливок с заданной структурой включает в себя следующие основные этапы:

- получение на стартовом участке формы направленной структуры, состоящей из множества столбчатых зерен с произвольной ориентацией;
- конкурентный рост столбчатых зерен в кристаллоотборнике и вытеснение тех из них, ориентация которых наиболее удалена от предпочтительного направления роста, которое для сплавов с ГЦК решеткой совпадает с направлением [001]. Основная сложность решения задачи на этой стадии состоит в том, чтобы выделить и подвести к отливке только одно зерно;
- формирование структуры самой отливки.

Наибольшее распространение в промышленности для изготовления отливок с монокристаллитной структурой получили кристаллотборники двух конструкций: «прямой угол» и «геликоид».

В первом случае (рис.4.11) перегретый металл заливают в оболочковую форму без дна, которая устанавливается на медном водоохлаждаемом кристаллизаторе. В результате интенсивного охлаждения расплава в стартере 1 зарождается множество мелких равноосных зерен, которые начинают расти в условиях направленного теплоотвода и приобретают столбчатую морфологию. Так как наиболее благоприятной для роста столбчатых зерен является ориентация [001], то те дендриты, которые имели такую ориентацию имеют несколько повышенную температуру вершин и поэтому опережают по темпам роста соседние дендриты

и, по мере роста, они будут постепенно вторгаться на «территорию своих соседей» и вытеснять их.

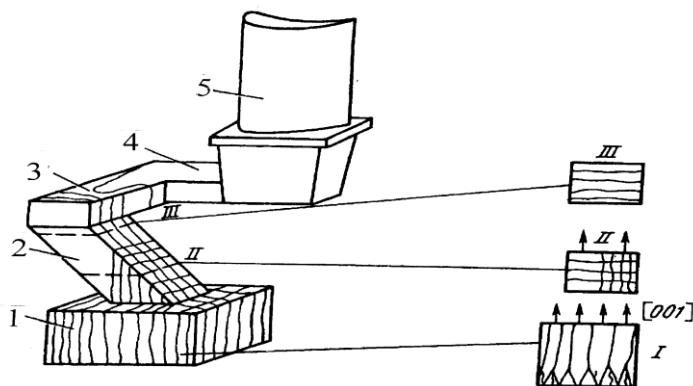


Рис.4.11. Схема конструкции литниковой системы с кристаллосборником «прямой угол»

Сформированная в стартере 1 мелко столбчатая структура с аксиальной текстурой $[001]$ прорастает в систему литниковых ходов 2, 3, 4, где и осуществляется отбор одного зерна. Этот процесс начинается в вертикальном направлении в литниковом ходе 2, а затем - в горизонтальной плоскости в двух направлениях, при этом в ходах 3 и 4 происходит конкурентный отбор зерен в азимутальной плоскости. Так как здесь наибольшее развитие получают те зерна, аксиальная ориентация $[001]$ которых ближе всего к вектору температурного градиента, а азимутальная ориентация $[100]$ наиболее близка к направлению проекции оси наклонного литникового хода на поперечную плоскость. В таких кристаллах дендритные оси первого и второго порядков активней прорастают в расплав. Таким образом, происходит выклинивание, как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. При правильном проведении процесса в лопатку 5 прорастает только один кристалл с аксиальной ориентацией $[001]$ и произвольной азимутальной ориентацией.

Методом конкурентного роста принципиально можно получить дважды ориентированные монокристаллитные отливки. Это достигается созданием дополнительного радиального холодильника, за счет которого происходит конкурентный рост между пластинчатыми кристаллами. Два варианта таких устройств представлены на рис.4.12.

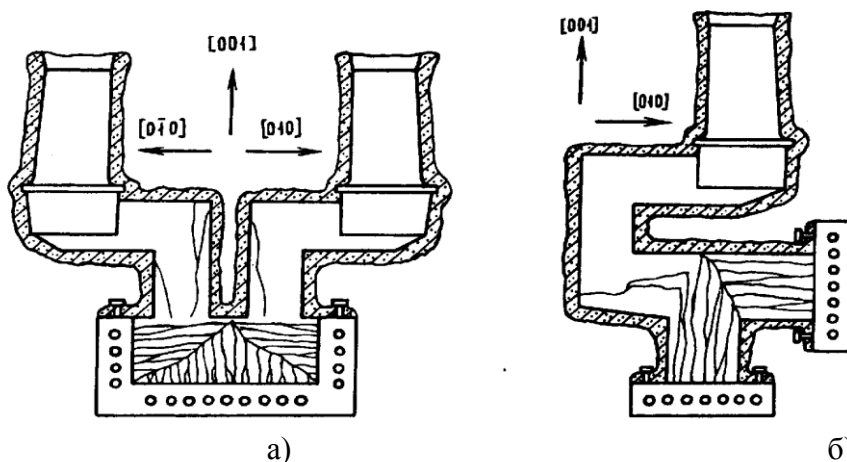


Рис.4.12. Схемы конструкции радиальных холодильников для получения дважды ориентированных монокристаллитных лопаток

Высокую надежность изготовления отливок с заданной кристаллографической ориентацией показал способ литья, предложенный П.В. Лебедевым и представленный на рис.4.13. Донная часть формы выполнена так же, как и в предыдущем способе литья, однако вместо наклонного канала используется горизонтальная керамическая пластинка с отверстием малого диаметра. В результате конкурентного отбора через это отверстие в полость формы попадает только одно зерно, которое и продолжает свой рост, обеспечивая получение монокристаллитной отливки.

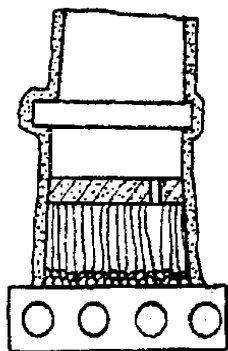
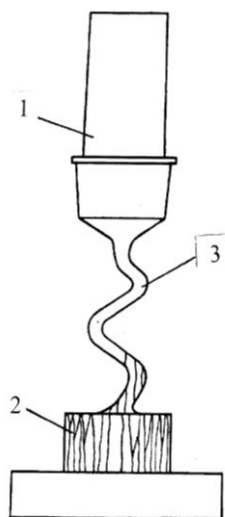


Рис.4.13. Схема устройства для получения монокристаллитных отливок

Используемый в промышленности для получения отливок с монокристаллитной структурой кристаллосборник в форме спирали или геликоида представляет собой видоизмененный кристаллосборник, представленный на рис.4.14. Существуют различные конструкции и технологии изготовления таких геликоидов.



*Рис.4.14. Схема геликоида для получения монокристаллитных лопаток:
1 – стержень; 2 – лопатка; 3 – геликоид*

По одной из них для формирования такого кристаллосборника используются металлические спиральные вставки, покрытые модельной массой. После ее удаления при вытопке блока эти вставки вывинчиваются из формы и используются повторно. Опытным путем были установлены основные размеры геликоидов: угол подъема спирали $12 \dots 16^\circ$, диаметр

10 ... 15 мм, число витков 1 ... 5, толщина керамики на витках 6,5 ... 7,5 мм, отношение шага спирали к ее толщине 1,2 ... 1,4.

Методы получения монокристаллов с использованием затравок более трудоемки, так как требуют отдельной технологии получения совершенных по структуре затравок, однако позволяют получать отливки с заданной как аксиальной, так и азимутальной ориентацией с ошибкой не более 2°.

На рис.4.15 приведена схема литейной формы для получения отливок вышеуказанным методом. Литейная форма 1 без дна установлена на водоохлаждаемом кристаллизаторе 2, в котором выполнено специальное углубление для установки затравки 3 цилиндрической формы. Над затравкой имеется диафрагма 4, сообщающаяся с конусом 5.

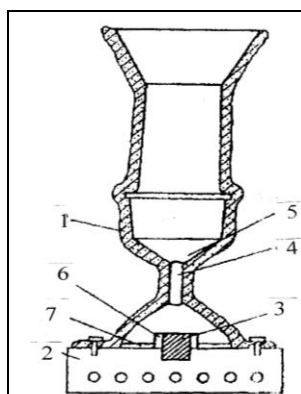


Рис.4.15 Схема литейной формы для получения отливки от затравки

При разливке расплава торец затравки подплавляется, и монокристаллическая структура передается изделию. При этом рост кристаллов происходит от затравки и поверхности холодильника. Однако кристалл, растущий от затравки, входит в диафрагму 4, а остальные кристаллы отсекаются. Для повышения надежности передачи структуры от затравки последнюю иногда заключают в керамическую оболочку 6, а на поверхность холодильника укладывают керамическую пластинку 7.

Этим достигается преимущественный контакт торца затравки с расплавом и несколько замедляется скорость роста кристалла от холодильника.

Промышленные установки для получения отливок с монокристаллитной структурой в России были разработаны ВИАМ и МАТИ и базировались на способе, разработанном Д.А. Петровым и А.Т. Тумановым. В основании керамической цилиндрической формы формируется стартовый козырек в форме усеченного конуса (рис.4.16). При подводе кристаллизатора к основанию конуса наибольшее переохлаждение расплава происходит в тонких кромках конусного козырька в точке А.

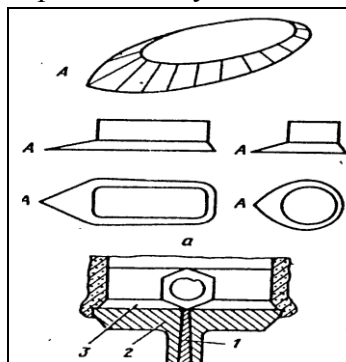


Рис.4.16. Конфигурации стартовых козырьков

В дальнейшем монокристаллический зародыш, возникший в точке А, растет по наиболее переохлажденным участкам расплава в кромке стартового козырька и обегает его. Одновременно с этим монокристаллическая структура распространяется по дну конусного козырька от периферии к центру. Точка А, таким образом, является местом зарождения монокристаллического зародыша произвольной ориентации.

Для получения отливки с заданной ориентацией необходимо в точку А подвести соответствующую затравку. Надежная передача структуры от затравки к изделию осуществляется только в том случае, когда верхний торец ее полностью расплавлен, а остальная часть остается твердой, то есть в затравке должен быть создан осевой температурный градиент.

В настоящее время получение монокристаллитных отливок, типа «Лопатка», осуществляется в России на промышленных установках УВНК-8П и 1ИСВ-0,01-НФ. На рис.4.17 представлена схема теплового узла и блока литейной формы для получения отливок на установке высокоскоростной направленной кристаллизации. Каждая лопатка 1 получается от одной затравки 2, а подвод структуры от затравки к лопатке осуществляется в конусной полости 3 от пера к замку.

В печи подогрева форм УВНК-8П установлены два графитовых нагревателя сопротивления: верхний нагреватель 4 служит для разогрева блока форм, нижний нагреватель 5 меньшего размера расположен непосредственно над емкостью с расплавленным алюминием и формирует тепловые условия в зоне фронта кристаллизации. Под нагревателем 5 установлен тепловой экран 7, который предотвращает перегрев алюминия, отсекая тепловое излучение из печи подогрева форм.

Таким образом, процесс кристаллизации в печи УВНК-8П состоит из двух этапов: 1) начало кристаллизации и рост в конусе за счет радиационного теплоотвода от поверхности формы; 2) кристаллизация собственно отливки в жидкометаллическом охладителе за счет теплопроводности и конвективной теплоотдачи.

Схема получения отливки «Лопатка рабочая» на установке 1ИСВ-0,01-НФ приведена на рис.4.18. Отливку проводят блоками из четырех лопаток, на замковых частях которых были изготовлены стартовые козырьки, соприкасающиеся в одной точке-месте установки затравки. Однако эксплуатация этой печи периодического действия показала, что она не удовлетворяет потребности серийного производства из-за низкой производительности.

Использование печи ПМП-2 проходного типа долгое время было сопряжено с большими трудностями из-за того, что формы в этой установке разогреваются выше температуры ликвидуса сплава, а установка специальных холодильников для затравок была сопряжена со значительными сложностями. Проблема была решена при использовании затравок из более тугоплавких сплавов.

Рис.4.17. Схема теплового узла и блока литейных форм для получения монокристаллитных лопаток в печи УВНК-8П	Рис.4.18. Схема получения монокристаллитных лопаток в печи ИСВ-0,01-НФ

Выбор технологических параметров литья с направленной кристаллизацией.

Конструкция литниково-питающей системы зависит от выбранного способа литья с направленной кристаллизацией и схемы установки, но общие принципы, которые необходимо соблюдать при ее разработке, можно сформулировать следующим образом:

- нижняя часть формы или отливки при кристаллизации расплава снизу или их верхняя часть при кристаллизации сверху должны иметь плоскую поверхность для лучшего контакта с поверхностью кристаллизатора;
- отливки в блоке должны располагаться так, чтобы наиболее нагруженные в процессе эксплуатации части (например, «перо лопатки») располагались продольно по отношению к направлению теплоотвода;
- более массивный узел отливки (например, «замок лопатки») целесообразно располагать со стороны подвода кристаллизатора;
- количество отливок в блоке определяется емкостью порционной плавильной печи, размером внутренней полости печи подогрева, кристаллизатора или ванны с расплавом металла.

Расчет размеров ЛПС, если это необходимо, можно произвести по методам приведенных толщин или вписанных сфер с учетом того, что размеры прибылей могут быть уменьшены в 1,5 ... 2,0 раза по сравнению с расчетными, так как компенсация усадки сплава в отливке происходит за счет понижения общего уровня расплава в прибыли без образования усадочной раковины.

Основными технологическими параметрами процесса литья являются температуры: формы, расплава при заливке, печи подогрева, а также скорость вытягивания формы из зоны действия печи подогрева или расплава.

Значение температуры формы выбирается обычно на 15 ... 20° выше температуры ликвидуса сплава.

Температура заливки принимается на $40 \dots 70^\circ$ выше температуры ликвидуса сплава. Целесообразно перед заливкой провести термовременную обработку расплава с целью дезактивации примесей и повышения стабильности роста кристаллов.

Температура в зоне печи подогрева выбирается обычно не ниже температуры ликвидуса сплава.

Очевидно, что при стационарном режиме направленной кристаллизации фронт кристаллизации должен быть неподвижен относительно нагревателя, т.е. скорость продвижения фронта кристаллизации R должна быть равна по абсолютной величине скорости вытягивания W

$$W = R = dx/dt.$$

В этом случае на фронте кристаллизации должен соблюдаться тепловой баланс подводимой и отводимой теплоты

$$Q_{отв} = Q_L + Q_{подв},$$

где $Q_{отв}$ – количество теплоты, отводимой в единицу времени от фронта кристаллизации в твердую фазу; Q_L – скрытая теплота кристаллизации; $Q_{подв}$ – количество теплоты, отводимой в единицу времени к фронту кристаллизации из расплава.

Очевидно, что

$$Q_{отв} = S \lambda_m (dt / dx)_s,$$

$$Q_L = S \rho_m L(dx / dt),$$

$$Q_{подв} = S \lambda_{жс} (dt / dx)_L,$$

где S – площадь сечения получаемой отливки; λ_m и $\lambda_{жс}$ – теплопроводность сплава в твердом и жидком состояниях; ρ_m – плотность сплава в твердом состоянии; L – теплота кристаллизации; $(dt / dx)_s$ и $(dt / dx)_L$ – температурные градиенты в твердой и жидкой фазах перед фронтом кристаллизации; (dx / dt) – скорость продвижения фронта кристаллизации. Подставим полученные значения тепловых потоков в уравнение теплового баланса и, решив его относительно скорости кристаллизации, получим

$$R = (dx / dt) = 1 / \rho_m [\lambda_m (dt / dx)_s - \lambda_{жс} (dt / dx)_L].$$

Для фасонных отливок величина площади сечения по высоте, например, рабочей лопатки будет изменяться, поэтому подобные задачи целесообразнее решать с использованием численных методов на ЭВМ.