



ТЕХНОЛОГИИ

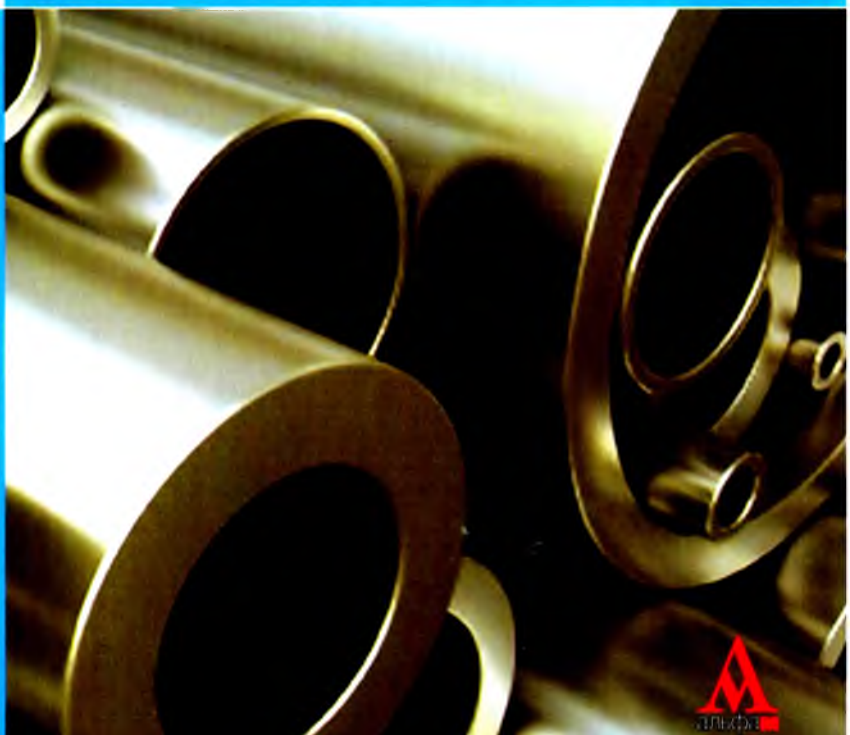
Е.Л. Бибииков
А.А. Ильин

Литье

ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Учебное пособие

СОВРЕМЕННЫЕ



ЛИТЬЕ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ



Е.Л. Бибиков
А.А. Ильин

Литье

ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

Допущено Учебным объединением высших учебных заведений РФ по образованию в области материаловедения, технологии материалов и покрытий в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров 150100 «Материаловедение и технологии материалов»

УДК 669.018(075.8)

ББК 34.24

Б59

Рецензенты:

доктора технических наук *А.М. Мамонов, Н.А. Ночовная*

Бибиков, Е.Л.

Б59 **Литье титановых сплавов : учебное пособие / Е.Л. Биби-
ков, А.А. Ильин. — М. : Альфа-М : ИНФРА-М, 2014. — 304 с. :
ил. — (Магистратура).**

ISBN 978-5-98281-364-0 («Альфа-М»)

ISBN 978-5-16-009150-1 («ИНФРА-М»)

Изложены теоретические и технологические основы процессов, имеющих место при производстве слитков и отливок из титановых сплавов. Приведены сведения о свойствах, химическом и фазовом составах литейных и деформируемых титановых сплавов, а также о конструкциях плавильных печей и плавно-заливочных установок, методах изготовления литейных форм и способах повышения их химической инертности.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению «Материаловедение и технологии материалов». Может быть полезно студентам вузов других специальностей при изучении материаловедческих и технологических процессов.

УДК 669.018(075.8)

ББК 34.24

ISBN 978-5-98281-364-0 («Альфа-М»)
ISBN 978-5-16-009150-1 («ИНФРА-М»)

© Бибиков Е.Л., Ильин А.А., 2014
© «Альфа-М» : «ИНФРА-М», 2014

ВВЕДЕНИЕ.

СВОЙСТВА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

Титан является одним из наиболее распространенных элементов. По содержанию в земной коре он стоит на десятом месте, а среди металлов, используемых в качестве конструкционных материалов, занимает четвертое место, уступая только алюминию (8,8 %), железу (5,1 %) и магнию (2,35 %); (титан — 0,61 %, а все остальные используемые в промышленности металлы — 0,2 %).

Титан расположен в IVA подгруппе первого большого периода Периодической системы Д. И. Менделеева, атомный номер титана 22, атомная масса 47,90. Температура плавления 1665 °С. Титан имеет две аллотропические модификации. Низкотемпературная α -модификация существует до 882,5 °С, обладает гексагональной плотноупакованной решеткой. При температуре 25 °С периоды решетки α -титана составляют: $a = 0,295111$ нм; $c = 0,468433$ нм; $c/a = 1,587$. Высокотемпературная β -модификация (β -титан) устойчива от 882,5 °С до температуры плавления, имеет объемноцентрированную кубическую решетку с периодом 0,3282 нм.

По плотности титан занимает промежуточное положение между двумя основными конструкционными металлами — алюминием и железом. Плотность титана при комнатной температуре равна 4,505 кг/м³. Плотность β -титана при 900 °С равна 4319 кг/м³, а жидкого титана при температуре, близкой к температуре кристаллизации, — 4110 кг/м³.

Отличительная особенность титана — низкий коэффициент теплопроводности: при температуре 20 °С он равен 13,4 Вт/(м·К), что в 13 раз меньше, чем у алюминия, и в 5 раз меньше, чем у железа. Удельная теплоемкость титана при 20 °С равна 0,525 кДж/(кг·К). С ростом температуры удельная теплоемкость возрастает и при температуре 1500 °С достигает 0,698 кДж/(кг·К).

При температуре 1700—1750 °С удельная теплоемкость жидкого титана равна 1,18 кДж/(кг·К), а коэффициент теплопровод-

ности — 24 Вт/(м·К). Удельная теплота кристаллизации титана составляет 419 кДж/кг, что в 1,6 раза больше, чем у железа. Поверхностное натяжение жидкого титана при 1700–1750 °С составляет 1390 ± 40 МДж/м².

При относительно невысоком содержании примесей титан обладает хорошей пластичностью и низкой прочностью (табл. В1).

Таблица В1. Сравнительная характеристика свойств титана и других конструктивных металлов

Показатель	Титан	Алюминий	Магний	Железо	Никель	Медь
Температура плавления, °С	1665	659	650	1539	1455	1083
Температура кипения, °С	5100	2100	1090	2735	3337	2360
Плотность ρ , кг/м ³	4500	2700	1740	7860	8800	8900
Предел прочности при растяжении σ_B , МПа	340	98	98	196	320	245
Удельная прочность, $(\sigma_B / \rho) 10^2$	7,5	3,6	5,6	2,5	3,6	2,7
Удлинение, %	50	40	20	40	40	50
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	13,4	217,9	145,7	84	59,5	385,5
Содержание в земной коре, %	0,61	8,8	2,35	5,1	0,018	0,01

Механические свойства титана очень сильно зависят от примесей кислорода, азота и углерода, которые образуют с титаном твердые растворы и различные химические соединения. Наиболее сильное упрочняющее действие с одновременным снижением пластичности на титан оказывают азот, затем кислород и углерод.

Модуль нормальной упругости E титана в зависимости от ориентировки кристаллических зерен и содержания примесей изменяется в широких пределах — от 106 до 146 ГПа. Среднее значение модуля упругости $E = 112$ ГПа. С повышением температуры модуль упругости снижается почти по линейному закону и при 600 °С равен 70–80 ГПа.

Небольшой модуль упругости — недостаток титана как конструкционного материала, так как в отдельных случаях для получения жестких конструкций приходится увеличивать сечения изделия по сравнению с теми, которые следуют из условий прочности.

В табл. В1 приведены сведения о некоторых свойствах титана и других металлов, являющихся основой большинства конструкционных сплавов.

Титан — химически активный металл, тем не менее во многих агрессивных средах он обладает исключительно высоким сопротивлением коррозии, в большинстве случаев выше, чем у лучших марок нержавеющей стали. Такое поведение титана связано с образованием на его поверхности плотной оксидной пленки TiO_2 , которая надежно защищает металл до температур 300—500 °С. Поэтому титан химически инертен в тех средах, которые либо не разрушают TiO_2 , либо способствуют ее образованию. Так, титан устойчив в разбавленной серной кислоте, уксусной и молочной кислотах, сероводороде, во влажной хлорной атмосфере, в царской водке и во многих других агрессивных средах. Введение в титан таких легирующих элементов, как молибден, цирконий, ниобий, тантал, значительно повышает коррозионную стойкость титана.

Титан интенсивно реагирует с плавиковой, соляной и серной кислотами, с горячими растворами щавелевой, трихлоруксусной кислот, а также с галогенами, фтористыми соединениями, смесями фтористых и хлористых солей щелочных металлов. При температуре выше 500—700 °С оксидная пленка TiO_2 растрескивается и ее защитные функции резко снижаются. Поэтому при высоких температурах и особенно в жидком состоянии титан активно взаимодействует практически со всеми известными простыми и сложными по химическому составу веществами, особенно с газами — кислородом, азотом, водородом, оксидом и диоксидом углерода, водяным паром и др.

Титановые сплавы обладают замечательной совокупностью свойств, которые выгодно выделяют их из остальных сплавов.

Во-первых, это высокая прочность при малом удельном весе. В табл. В2 приведены данные по удельной прочности ($\sigma_{\text{в}}/\rho$) ряда конструкционных сплавов, откуда следует, что детали из титановых сплавов при той же массе, что и детали из других конструк-

ционных сплавов, оказываются примерно в 2–3 раза прочнее. С увеличением температуры эта разница существенно возрастает.

Таблица В2. Сравнительная характеристика механических свойств литейных сплавов (удельная прочность)

Основа сплава	Марка сплава	Плотность ρ , кг/м ³	Предел прочности σ_B , МПа	Удельная прочность $(\sigma_B/\rho)10^2$
Алюминий	АК12	2660	160	6,0
	АК9	2650	230	8,7
	АМ5	2780	335	12,0
Магний	Мл-5	1830	230	12,6
	Мл-12	1810	230	12,7
Железо	Сталь 25Л	7850	450	5,7
	X18H9ТЛ	7900	490	6,2
Титан	BT5Л	4410	690	15,4
	BT20Л	4500	940	20,9

Во-вторых, титан отличается исключительной химической стойкостью при низких температурах (до 300–500 °С). Во влажном воздухе, морской воде, азотной кислоте он противостоит коррозии не хуже лучших марок нержавеющей стали, а в соляной кислоте – во много раз лучше ее.

К недостаткам титана и его сплавов можно отнести:

- ◇ высокую химическую активность титана при высоких температурах, особенно в жидком состоянии. Это обстоятельство серьезно осложняет проведение технологических операций, при которых требуется нагрев металла до высоких температур (плавка и литье, сварка, обработка давлением и др.);
- ◇ относительно плохую обрабатываемость резанием;
- ◇ более высокую стоимость производства титана по сравнению с железом, алюминием, магнием, медью.

Уникальные свойства титана и его сплавов определяют их широкое использование.

Титановые сплавы находят широкое применение как конструкционный материал в ряде ведущих отраслей техники, в первую очередь в авиакосмической, ракетной, судостроительной и химической промышленности.

Применение титановых сплавов позволяет значительно повысить технико-экономические показатели машиностроительной продукции, поэтому объем производства титана и титановых сплавов непрерывно возрастает. По темпам роста производство титана не имеет равных себе среди прочих конструкционных металлов. Первые две тонны титана были получены в 1947 г., в 1954 г. производство составило 5000 т, а в 1976 г. мировое производство превысило 200 000 т.

Интенсивное развитие производства титана связано с рядом его уникальных свойств, таких, как низкая объемная плотность, высокие механические свойства, отличная коррозионная стойкость в морской воде и ряде агрессивных химических сред, относительно хорошие технологические параметры.

На начальном этапе промышленного использования титановых сплавов была освоена технология литья слитков и получения из них листов, поковок, штамповок, прутков, труб, профилей путем деформирования. На этом этапе основное внимание было сосредоточено на разработке технологического процесса плавки и литья слитков и создании высокопрочных и технологичных деформируемых титановых сплавов. Были опробованы и исследованы различные технологические варианты плавки и литья. В конечном итоге появились промышленные установки для производства слитков, в которых плавка и литье слитков осуществляются в вакууме, расплавление металла производится электрической дугой, а в качестве шихты для первого переплава используют специально изготовленный расходный электрод из титановой губки и легирующих компонентов. Получаемые при этом способом плавки слитки неоднородны по химическому составу, поэтому их вторично переплавляют, используя в качестве расходного электрода для получения слитка второго переплава, металл которого при соблюдении технологического процесса становится однороден по химическому составу.

Подобный технологический процесс изготовления слитков имеет ряд недостатков, которые не позволяют повысить его экономическую эффективность. Поэтому ищутся новые варианты плавки и литья слитков. Весьма перспективен при производстве слитков гарнисажный метод плавления шихты, который позволяет вводить в плавку необходимое количество производст-

венных титановых отходов и обеспечивает получение однородного по химическому составу расплава.

Данный метод плавки металла и литья слитков отличается высокой экономической эффективностью. Однако для его широкого практического использования необходимо решить сложные металлургические и технические проблемы. Поэтому в ближайшей перспективе основной принципиальной схемой плавки и литья слитков из титановых сплавов останется технологический процесс, разработанный на начальном этапе промышленного использования титановых сплавов.

В середине 1950-х гг. был разработан технологический процесс изготовления фасонных отливок из титановых сплавов. Были спроектированы и изготовлены специальные виды оборудования, созданы композиции формовочных материалов для производства литейных форм. В последующие годы технологический процесс совершенствовался и в настоящее время для изготовления отливок используются:

- ◇ вакуумные электродуговые печи с плавкой расходуемого электрода в гарнисажных графитовых или медных тиглях;
- ◇ литейные формы, изготовленные из наиболее огнеупорных и химически инертных по отношению к титану материалов, с последующей их обработкой, направленной на повышение их химической инертности;
- ◇ центробежное литье в вакууме фасонных отливок, обеспечивающее улучшение заполняемости литейных форм и повышение качества литого металла.

Применяемый в настоящее время технологический процесс позволяет получать отливки сложной конфигурации с высоким качеством металла. Вместе с тем отдельные этапы технологического процесса производства фасонных отливок из титановых сплавов требуют дальнейшего совершенствования. В первую очередь это относится к разработке:

- ◇ новых способов заполнения рабочей полости литейных форм расплавом вместо центробежного литья;
- ◇ методов, повышающих химическую инертность литейных форм;
- ◇ мероприятий, направленных на снижение расхода металла на литниково-питающую систему;
- ◇ более эффективных методов плавления титановых сплавов.

Решение этих проблем позволит значительно повысить экономическую эффективность производства деталей из титановых сплавов методами фасонного литья и улучшить качество литого металла.

Титан и его сплавы широко используются в производстве летательных аппаратов и в первую очередь в производстве самолетов, ракет и их двигателей.

Применение титана в планере самолета позволяет уменьшить его массу на 20–25 % и соответственно увеличить скорость и дальность полета, грузоподъемность, маневренность. Из титановых сплавов изготавливают различные детали реактивных двигателей — кожухи камеры сгорания, капоты, роторы турбин, компрессорные лопатки и др., а также каркасы фюзеляжа, шпангоуты, трубопроводы, лонжероны, детали шасси, обшивки самолета. Из титана изготавливают и крепежные изделия — болты, гайки, заклепки.

Масса деталей из титановых сплавов достигает 25–28 % массы всего двигателя, а в планере самолета масса титановых сплавов равна примерно 7–10 %. Суммарная масса деталей из титановых сплавов в самолете Ту-154 составляет 490 кг, т.е. 2 % массы самолета, а в более современном самолете Ту-204 масса титановых деталей 2560 кг, или 9 % его общей массы. В самолете Ил-96-300 масса титановых деталей достигает 8295 кг (9,5 % массы самолета). В современных истребителях общая масса деталей из титановых сплавов приближается к 25–30 % массы самолета.

Широкое применение титановые сплавы находят в космических кораблях и аппаратах, ракетах-носителях. Космический корабль «Аполлон» содержит 60 т различных деталей и агрегатов из титановых сплавов. Почти полностью были выполнены из титановых сплавов космические корабли США серий «Меркурий» и «Джеминч», ракета-носитель «Титан» и др.

Отличная коррозионная стойкость титана в морской среде в совокупности с малым удельным весом и высокой прочностью делают его весьма ценным конструкционным материалом для судостроения. Детали из титановых сплавов отлично противостоят эрозии и кавитации. В движущейся морской воде со взвешенными в ней песчинками титан примерно в 12 раз более стоек, чем самые лучшие сплавы, используемые для данных целей. Из титановых сплавов изготавливают валы, гребные винты, обшивку подвод-

ных лодок и морских судов, выхлопные глушители и палубную арматуру подводных лодок и т.д.

Большие перспективы титановые сплавы имеют в машиностроении. Однако из-за дефицитности, технологических трудностей обработки и высокой стоимости применение титановых сплавов в машиностроении пока ограничено. Тем не менее из титановых сплавов изготавливают множество видов оборудования в химической промышленности — запорную и перекачивающую аппаратуру, разнообразные емкости, трубы, фильтры, автоклавы, насосы, адсорберы и др.

Широко используются титан и его сплавы при изготовлении теплообменной аппаратуры, применяемой для подогрева, кипячения, испарения, конденсации и охлаждения различных жидких и газовых агрессивных сред. Для всех типов этих аппаратов титановые сплавы дают возможность повысить коррозионную стойкость и эффективность теплообмена при минимальной толщине стенок.

Титановые сплавы находят все большее применение для изготовления различных видов оборудования, деталей, агрегатов и техники в черной и цветной металлургии, целлюлозно-бумажной и пищевой промышленности, энергетическом машиностроении, медицинской промышленности, военной технике, атомной энергетике, приборостроении, электронике, экспедиционном и спортивном снаряжении, бытовой технике и др.

1.1. Взаимодействие титана с водородом

Титан энергично взаимодействует с кислородом, азотом и парами воды, входящими в состав атмосферы. Кислород и азот в процессе взаимодействия растворяются в титане, образуя различные по составу химические соединения — оксиды и нитриды. Пары воды, реагируя с титаном, разлагаются на кислород и водород, который также растворяется в титане и при определенной концентрации образует с титаном химическое соединение — гидрид титана.

Взаимодействие газов с титаном резко интенсифицируется при высоких температурах.

Все эти элементы, растворяясь в титане, резко изменяют его механические свойства, особенно пластические характеристики. Поэтому содержание указанных газов в титане и его сплавах не должно превышать допустимых концентраций.

На рис. 1.1 представлена диаграмма состояния титан—водород, из которой следует, что в структуре титана в зависимости от концентрации водорода (до 3 % по массе) образуются следующие фазы: твердый раствор водорода в α -фазе; твердый раствор водорода в β -фазе; δ -гидрид с гранецентрированной кубической решеткой и γ -метастабильный гидрид с гранецентрированной решеткой с соотношением осей $c/a < 1$. При концентрации водорода 1,33 % по массе и температуре 300 °С протекает эвтектоидное превращение $\beta \leftrightarrow \alpha + \delta$. Растворимость водорода в α -титане сильно уменьшается с понижением температуры. При этом из пересыщенного

α -раствора выделяются гидриды. Растворимость водорода в α -титане при комнатной температуре равна 0,002–0,005 % (по массе).

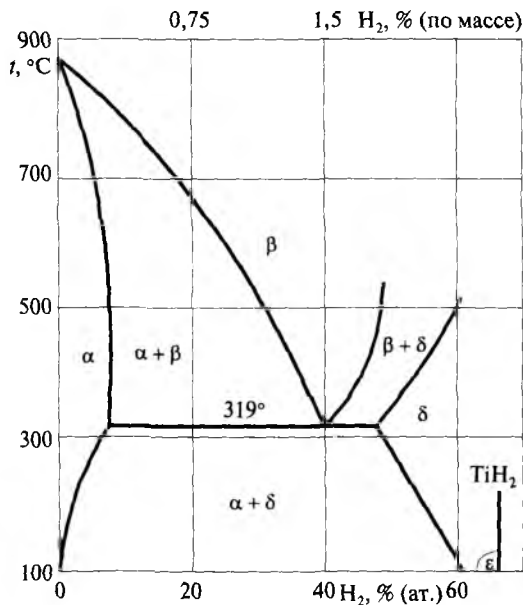


Рис. 1.1. Диаграмма состояния системы титан–водород

Растворы водорода в β -фазе обладают широкой областью гомогенности. Водород относится к эвтектоидообразующим β -стабилизаторам и сильно расширяет температурный интервал существования β -фазы. В объемно-центрированной решетке β -титана тетраэдрические междоузлия с радиусом 0,044 нм почти точно соответствуют атомному радиусу водорода (0,046 нм). Поэтому водород хорошо растворяется в β -фазе. Установлено, что твердый раствор водорода в β -титане не может быть зафиксирован закалкой при комнатной температуре ни при каких концентрациях водорода и ни при каких скоростях охлаждения металла.

Выделение гидридов, имеющих меньшую плотность и соответственно больший удельный объем (плотность гидрида $\text{TiH}_{1,63}$ составляет 3,912 г/см³, что на 13 % меньше плотности титана, а плотность $\text{TiH}_{1,99}$ на 16,7 % меньше плотности титана), является причиной возникновения в металле значительных растягивающих напряжений. Образование гидридов в структуре титана приводит к гидридной хрупкости металла, которая наиболее интен-

сивно проявляется в случае медленного охлаждения литой заготовки, когда выделения интерметаллидной фазы наблюдаются при крайне низком содержании водорода в металле. В связи с этим предельное содержание водорода в литейных α - и псевдо- α -титановых сплавах не должно превышать 0,01–0,015 % (по массе).

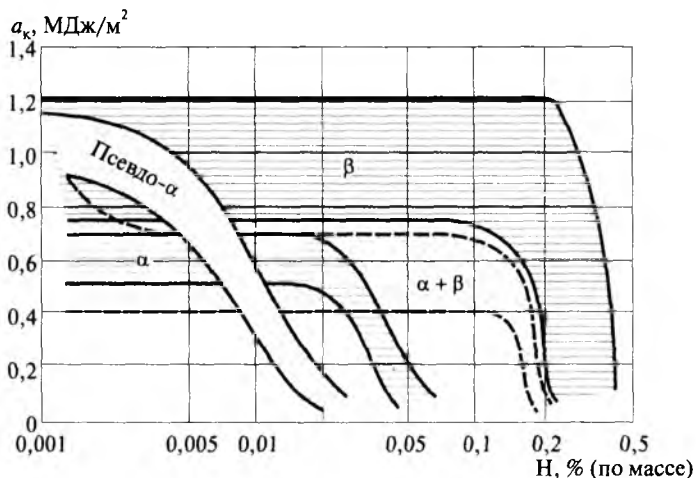


Рис. 1.2. Влияние водорода на ударную вязкость титановых сплавов

На рис. 1.2 представлены данные о влиянии водорода на ударную вязкость титановых сплавов, из которых следует, что при содержании водорода более 0,005 % по массе ударная вязкость псевдо- α -титановых сплавов начинает резко снижаться.

С увеличением содержания в структуре сплава β -фазы допустимое предельное содержание водорода несколько возрастает.

Растворимость водорода в титане (по данным В.И. Явойского и А.Д. Чучурюкина) описывается следующими уравнениями:

◇ в твердом титане

$$\lg [H]_T = 2730/T + 0,72 + 0,5 P_{H_2}; \quad (1.1)$$

◇ в жидком титане

$$\lg [H]_ж = 2460/T + 0,80 + 0,5 P_{H_2}. \quad (1.2)$$

В (1.1) и (1.2) концентрация водорода $[H]$ выражается в $\text{см}^3/100 \text{ г}$, а парциальное давление водорода P_{H_2} в кПа. Из уравнений (см. рис. 1.3) следует, что равновесное содержание водорода при

давлении 0,1 МПа и температуре 1665 °С составляет 1350 см³/100 г (0,12 % по массе) для твердого титана и 1180 см³/100 г (0,10 %) для жидкого титана.

Растворимость водорода в титановых сплавах зависит от содержания и вида легирующего элемента. Так, алюминий при концентрации более 3 % (по массе) увеличивает растворимость водорода в α-титане при комнатной температуре. Гидриды в α-фазе при 20 °С образуются свыше следующих концентраций алюминия в титане (по массе):

% алюминия	0	2	3	7
% водорода	0,005	0,005	0,0075	0,048

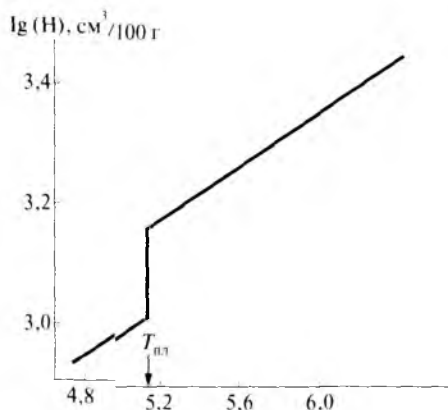


Рис. 1.3. Зависимость растворимости водорода в титане от температуры ($P_{H_2} = 1 \cdot 10^5$ Па)

С увеличением содержания кислорода в титане растворимость водорода при повышенных температурах также возрастает. Легирующие элементы — β-стабилизаторы — также повышают растворимость водорода в титановых сплавах.

Взаимодействие титана с водородом является сложным многостадийным процессом, включающим в себя: 1) массоперенос водорода в газовой среде; 2) физическую адсорбцию газа на поверхности металла; 3) хемосорбцию газа на поверхности металла; 4) переход водорода из поверхностного слоя в приповерхностный слой металла; 5) диффузию атомов водорода в объеме металла с образованием твердого раствора; 6) формирование гидридов.

В ряде случаев определяющую роль в скорости насыщения металла водородом играет его диффузия. Водород отличается необычайно высокой диффузионной подвижностью, что приводит к

быстрому перераспределению его по объему металла в процессе взаимодействия.

Коэффициент диффузии водорода в титане на несколько порядков выше, чем у других элементов.

Зависимость коэффициента диффузии от температуры и природы газа, в том числе водорода в титане, определяется выражением

$$D = D_0 \exp\left(\frac{Q}{RT}\right);$$

где D — коэффициент диффузии, м²/с; D_0 — предэкспоненциальный множитель, м²/с; Q — энергия активации при диффузии, Дж/моль; R — газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — абсолютная температура, К.

В табл. 1.1 представлены параметры диффузии водорода в йодидном титане, титане технической чистоты ВТ1П и сплаве ВТ5Л.

Таблица 1.1. Параметры диффузии водорода в титане и его сплавах

Металл	Температура, К	$D_0 \cdot 10^2$, см ² /с	Q , кДж/моль
Йодидный титан	923–1123	1,5	53,4
ВТ1Л	473–1073	3,3	57,8
ВТ5Л	473–1073	3,8	32,7

Экспериментально установлено, что скорость поглощения титаном водорода зависит от температуры и парциального давления водорода в газовой фазе, от степени легирования титана, размеров и формы кристаллического зерна и ряда других факторов. С ростом температуры скорость поглощения водорода титаном возрастает. Особенно резко она увеличивается при температурах выше 600 °С.

На рис. 1.4 приведены данные об изменении давления водорода в замкнутой системе при его поглощении техническим титаном, откуда следует, что при температурах 700–900 °С практически весь объем водорода поглощается титаном за 10–30 с.

Скорость поглощения водорода титаном значительно возрастает с ростом давления. Например, при давлении 13,3 кПа и температуре 600 °С через 5 мин после контакта с водородом титан поглощает около 200 г/см²·10⁵ водорода, тогда как при давлении

0,665 кПа при тех же условиях титан поглощает всего около $10 \text{ г/см}^2 \cdot 10^5$ водорода.

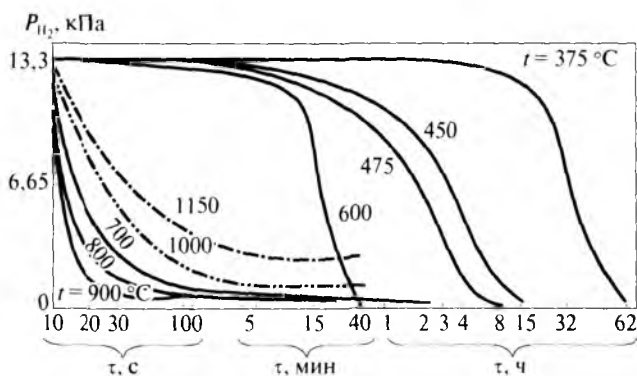


Рис. 1.4. Изменение давления в замкнутой системе при поглощении титаном водорода при разных температурах

Таким образом, водород с одной стороны, является вредной примесью, которая вызывает водородную хрупкость металла, а с другой — благодаря тому, что водород изменяет фазовый состав сплава и понижает температуру фазового превращения $\alpha \leftrightarrow \beta$, возникает ряд специфических эффектов, оказывающих положительное влияние и на свойства металла, и на повышение эффективности ряда технологических операций в производстве титановых полуфабрикатов и деталей.

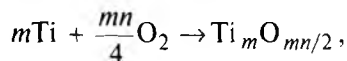
Водород с высокой скоростью не только поглощается, но и удаляется из титана, если металл подвергнуть вакуумному отжигу. При проведении различных технологических мероприятий в процессе производства полуфабрикатов или заготовок из титановых сплавов для достижения того или иного положительного эффекта в металл искусственно вводят определенное количество водорода, а после завершения технологического процесса водород удаляют из металла вакуумным отжигом. В этом случае водород является «временным легирующим элементом». Комплекс технологических операций, в которых используются положительные эффекты от введения водорода в титановые сплавы в качестве временного легирующего элемента, получил название «водородная технология» производства полуфабрикатов и заготовок из титановых сплавов. Эта технология как новое научное направление в мате-

риаловедении и технологии сформировалось на основе исследований, которые выполнялись в МАТИ с 1970 г. в содружестве с ведущими исследовательскими институтами авиационной промышленности¹.

1.2. Взаимодействие титана с кислородом

Кислород — основная примесь в титане и его сплавах. Она может: *а)* разрушить титан, образуя толстые и рыхлые слои окалины; *б)* создавать тонкие и плотные пленки оксидов, тем самым улучшать коррозионную стойкость титана; *в)* растворяться в титане, приводя к его упрочнению.

В общем случае реакцию взаимодействия твердого титана с кислородом можно описать в виде



где m — число атомов титана в молекуле оксида; n — валентность титана.

Диаграмма состояния системы титан—кислород приведена на рис. 1.5. Установлено, что в сплавах этой системы кроме твердого раствора кислорода в титане содержатся химические соединения TiO , Ti_2O_3 и TiO_2 и возможно образование оксидов Ti_3O_2 , Ti_3O_5 , Ti_6O , Ti_3O .

Кислород резко увеличивает стабильность α -фазы. Растворимость кислорода в α -фазе при температуре 800–1700 °С составляет около 15,5 %. Максимальная растворимость кислорода в β -титане 1,8 % наблюдается при перитектической температуре 1740 °С.

При температуре 925 °С в результате перитектической реакции α -твердого раствора кислорода в титане с концентрацией кислорода 15,5 % O_2 и химического соединения TiO (γ -фаза) с содержанием кислорода 23,5 % образуется δ -фаза, которой соответствует формула Ti_3O_2 или Ti_4O_3 .

¹ См. подробнее: Водородная технология титановых сплавов : под ред. акад. РАН А.А. Ильина. М. : МИСиС, 2002.

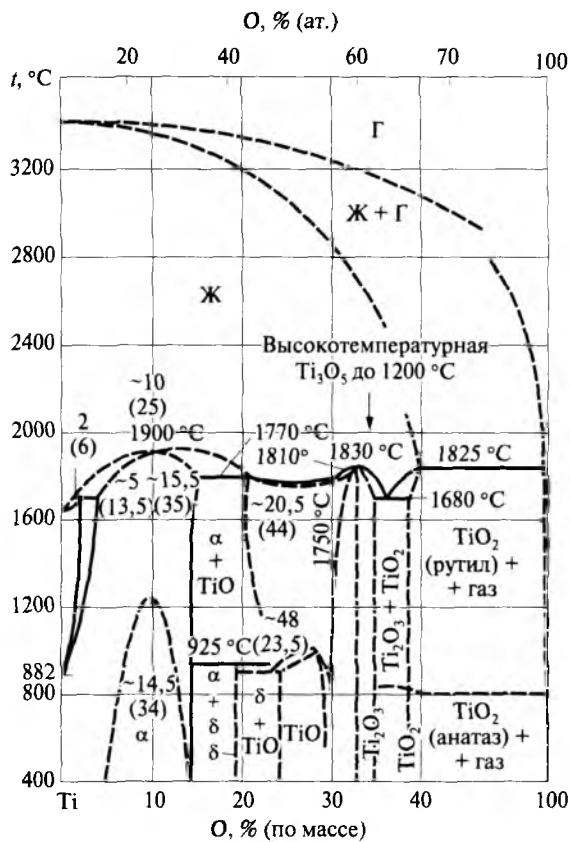


Рис. 1.5. Диаграмма состояния титан–кислород

Сплавы от 29,5 % до 32 % O_2 двухфазны и состоят из смеси $\gamma(\text{TiO})$ и Ti_2O_3 . От 32,5 % до 34,5 % O_2 располагается область гомогенной фазы Ti_2O_5 . При более высоком содержании кислорода наблюдается двухфазная область $\text{Ti}_2\text{O}_3 + \text{Ti}_3\text{O}_5$. При содержании кислорода свыше 37 % имеет место гомогенная область соединения TiO_2 ($t_{\text{пл}} = 1840^\circ\text{C}$).

Кинетика окисления титана при температурах до 350°C описывается логарифмическим законом.

Когда титан находится в атмосфере кислорода, скорость окисления при температурах $350\text{--}850^\circ\text{C}$ подчиняется параболическому закону:

$$(\Delta m)^2 = K_{\Pi} \tau,$$

где Δm — увеличение массы образца; τ — продолжительность взаимодействия; K_{Π} — константа параболического окисления.

В интервале температур 850–1200 °С окисление титана вначале описывается параболическим законом, а затем линейным:

$$\Delta m = K_{\Delta} \tau,$$

где K_{Δ} — константа линейного окисления.

В табл. 1.2 приведены значения константы параболической скорости окисления K_{Π} , г²/(см²·с), на начальной стадии взаимодействия при температурах 1070–1220 °С.

Таблица 1.2. Константы параболической скорости окисления титана

Температура, °С	Константа параболического окисления $K_{\Pi} \cdot 10^{10}$	
	В кислороде	На воздухе
1070	1	1
1120	2,2	2,5
1170	6	5,5
1220	15	20

При высоких температурах оксидная пленка растворяется в металле. Обогащенный кислородом поверхностный слой металла, в котором кислород растворяется в α - и (или) β -фазах титана, называют диффузионным или газонасыщенным. В диффузионном слое выделяют альфированный и переходный слои. Альфированный слой отличается по структуре от основного металла повышенным содержанием α -фазы. Диффузионный поверхностный слой имеет более высокую микротвердость, чем основной металл.

При температурах выше 800–900 °С наблюдается увеличение скорости разрушения оксидной пленки. Причиной разрушения являются сжимающие напряжения, возникающие в результате значительной разницы объемов оксида и металла. Молекулярный объем окалины на титане, состоящий из диоксида титана TiO_2 , в 1,6 раза больше, чем атомный объем титана.

Механизм взаимодействия титана с кислородом при наличии оксидной пленки не изучен полностью. Видимо, при окислении

протекают параллельно два процесса – диффузия через пленку ионов титана и ионов кислорода, а также растворение кислорода в титане.

Изменение концентрации кислорода в металле от поверхности в глубину определяется коэффициентом диффузии и оказывается более резким при низком его значении.

Параметры диффузии кислорода в титане представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Параметры диффузии кислорода в титане

Металл	$t, ^\circ\text{C}$	$D_0 \cdot 10^5, \text{м}^2/\text{с}$	$Q, \text{кДж/моль}$
$\alpha\text{-Ti}$	750–880	1,6	217,88
$\beta\text{-Ti}$	900–1200	4,5	150,84

Рентгенографическое исследование выявило сильное влияние кислорода на параметры кристаллической решетки α -титана. С увеличением содержания кислорода отношение c/a приближается к 1,633, что соответствует идеальной плотноупакованной решетке.

На рис. 1.6 показано влияние кислорода на механические свойства титана.

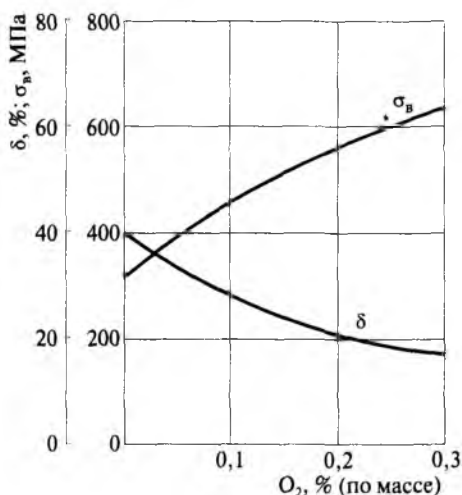


Рис. 1.6. Влияние кислорода на механические свойства титана

Воздействуя на кристаллическую решетку, кислород изменяет физико-механические и технологические свойства титана. При внедрении в октаэдрические пустоты α -титана кислород сильно искажает решетку и при этом существенно возрастают твердость и прочность титана, а его пластичность резко снижается. В области концентраций кислорода до 0,2 % каждая 0,01 % кислорода повышает предел прочности и текучести примерно на 12,5 МПа.

Снижение пластичности титана при повышении содержания кислорода до 0,25 % относительно невелико, поэтому содержание кислорода ограничивают в титане и его сплавах до предела 0,10–0,2 %.

1.3. Взаимодействие титана с азотом

Титан начинает взаимодействовать с азотом при криогенных температурах, образуя слой физически абсорбированного газа. При высоких температурах в результате взаимодействия титана с азотом образуются нитрид титана TiN и твердые растворы на основе α -, β - и TiN -фаз с обширными областями гомогенности (см. рис. 1.7).

Температура плавления титана с повышением содержания азота непрерывно возрастает и при 26 % (по массе) составляет 2950 °С (соединение TiN). Азот повышает температуру аллотропического превращения $\alpha \leftrightarrow \beta$.

Азот хорошо растворяется в α -титане (6,85 % при $t = 1050$ °С). С понижением температуры растворимость резко снижается.

Растворимость азота в β -твердом растворе значительно меньше и при перитектической температуре 2020 °С составляет 1,9 %.

В системе имеется широкая область гомогенности твердого раствора (δ) на основе нитрида титана TiN . Это соединение при стехиометрическом составе содержит 22,6 % N_2 . Решетка – кубическая (типа NaCl) и может существовать со значительным числом вакантных мест.

Нитрид титана при комнатной температуре обладает очень высокой твердостью (21 000 МПа).

При температуре 1050 °С по перитектоидной реакции $\alpha + \beta \leftrightarrow \epsilon$ образуется ϵ -фаза. Она имеет тетрагональную решетку и состоит в основном из химического соединения Ti_3N .

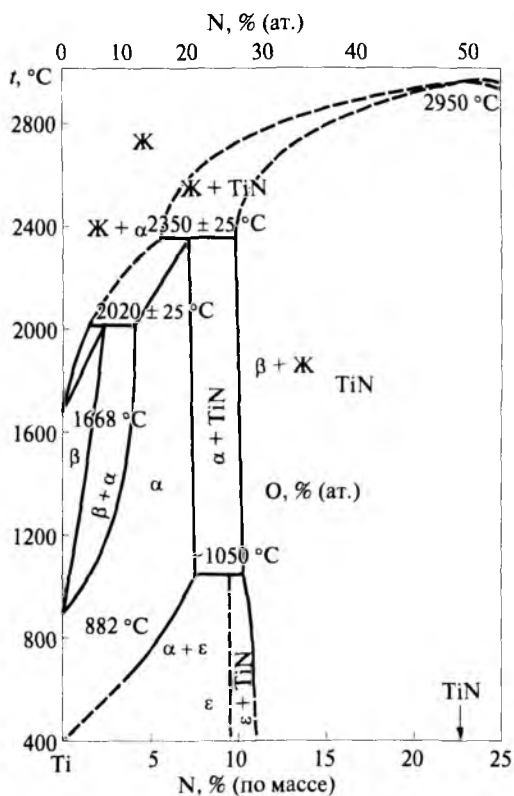


Рис. 1.7. Диаграмма состояния титан-азот

В сплавах титана с азотом β -фаза при закалке не фиксируется. В процессе охлаждения она испытывает мартенситное превращение.

Кинетика поглощения азота титаном подчиняется параболическому закону.

Скорость поглощения титаном азота примерно в 7 раз ниже, чем кислорода.

Установлено, что процесс взаимодействия титана с азотом определяется интенсивностью диффузии компонентов через плотную нитридную пленку. Пленка нитрида титана имеет золотисто-желтый цвет.

Азот по сравнению с другими примесями (кислород, водород, углерод) оказывает более сильное влияние на изменение механических свойств титана (рис. 1.8). Особенно сильное воздействие азот оказывает на пластические свойства (в 2 раза сильнее, чем ки-

слород). Поэтому содержание азота в титановых сплавах ограничивается 0,05 % (по массе).

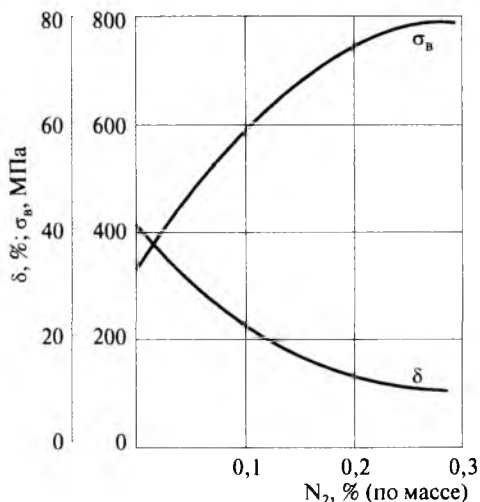


Рис. 1.8. Влияние азота на механические свойства титана

1.4. Взаимодействие титана с парами воды

Взаимодействие титана с парами воды осуществляется по реакции



При температурах 25–800 °С реакция (1.3) проходит практически полностью. Пары воды разлагаются титаном с образованием оксида титана и водорода, который поглощается титаном. Так как в атмосфере почти нет свободного водорода, то реакция (1.3) является основным источником наводороживания титана и его сплавов при технологических операциях.

Взаимодействие титана с парами воды на начальной стадии подчиняется параболическому закону, а затем сменяется линейной зависимостью (рис. 1.9).

При нагреве титана и его сплавов на воздухе заметное наводороживание происходит при температурах выше 750–800 °С. При проведении различных технологических операций (например,

термообработка) титановые сплавы подвергаются нагреву. Количество поглощенного водорода в этом случае зависит от температуры, продолжительности выдержки и абсолютной влажности воздуха. С увеличением этих параметров количество поглощенного металлом водорода, а также кислорода возрастает, что может привести к водородной хрупкости металла и образованию в поверхностном слое полуфабрикатов и заготовок газонасыщенного альфированного поверхностного слоя.

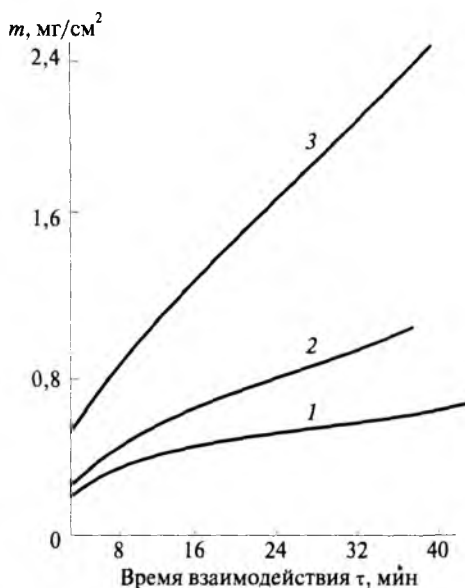


Рис. 1.9. Кинетические зависимости взаимодействия титана с парами воды при температурах 800 °C (1), 850 °C (2) и 900 °C (3) (давление $1 \cdot 10^5$ Па)

Так как в атмосфере электрических нагревательных печей сопротивления содержание паров воды значительно меньше, чем в топливных, работающих на газе или мазуте, то нагрев изделий из титановых сплавов целесообразно проводить в электрических печах.

1.5. Взаимодействие титана с элементами Периодической системы

Физико-химические свойства сплавов определяются характером химического взаимодействия металла с другими

элементами. Общие закономерности взаимодействия выявляются при анализе Периодической системы элементов Д.И. Менделеева.

На основе анализа взаимодействия элементов с титаном И.И. Корнилов разбивает все элементы Периодической системы на четыре семейства [10]:

- 1) взаимодействие отсутствует;
- 2) образуются соединения с ковалентной и ионной связью;
- 3) образуются твердые растворы с ограниченной растворимостью;
- 4) образуются твердые растворы с неограниченной растворимостью.

К числу элементов семейства 1 относятся инертные газы и элементы I и II групп (подгруппа А) Периодической системы элементов за исключением водорода и бериллия. В жидком и твердом состояниях элементы семейства 1 образуют два несмешивающихся слоя, что объясняется большими размерами атомных радиусов металлов I и II групп по отношению к титану. К элементам семейства 1 относятся литий, натрий, калий, магний, кальций и др.

Элементы семейства 2 (VI и VII группы, подгруппа В) интенсивно взаимодействуют с титаном и образуют различные соединения с ковалентной и ионной связью. К ним относятся галогены, кислород, сера и ее аналоги.

Высокая склонность титана к химическому взаимодействию с водородом, азотом и кислородом, которая приводит к охрупчиванию титана и понижает его жаропрочность, сказалась на технологии плавки и получения заготовок и полуфабрикатов из титана и его сплавов.

В противоположность свойствам элементов VI и VII групп отсутствие взаимодействия щелочных и щелочно-земельных элементов (за исключением бериллия) с титаном и большая активность этих металлов к кислороду и галоидам легли в основу технологии получения чистого металлического титана путем термических реакций восстановления кислородных или галоидных соединений титана. Для этой цели широко применяются магний, натрий и кальций.

Семейство 3 охватывает большое число элементов из VII и VIII групп (подгруппа А) и I–V групп (подгруппа В). Большинство из них металлы – марганец, железо, кобальт, никель, медь, цинк, алюминий, кремний, кадмий, олово, вольфрам и др. Эти элементы образуют соединения с титаном и способны в нем растворяться. Их твердые растворы в титане в α - и β -модификациях отличаются

ограниченными пределами концентраций, выше которых образуются соединения, имеющие металлический характер связи. Двойственная роль этих элементов объясняется сравнительно большим сходством атомных радиусов и различием химических свойств.

Элементы семейства 4 (в Периодической системе они расположены близко к титану) отличаются наибольшей склонностью к образованию твердых растворов (ванадий, хром, ниобий, молибден, цирконий, гафний, тантал). Твердые растворы металлов этого семейства с титаном отличаются непрерывной растворимостью компонентов либо в β -титане, либо в α - и β -титане одновременно. К ним относятся системы титана с его аналогами: титан–цирконий и титан–гафний. Они образуют с α - и β -модификациями непрерывные твердые растворы.

Элементы соседних с титаном V и VI групп – ванадий, ниобий, тантал, хром, молибден, вольфрам и уран – образуют с β -титаном непрерывные твердые растворы, а с α -титаном – ограниченные твердые растворы.

Элементы, отнесенные по характеру взаимодействия к семействам 3 и 4, представляют наибольший интерес для исследования и создания новых металлических сплавов на основе титана. Эти элементы склонны образовывать ограниченные и непрерывные твердые растворы и являются важнейшими элементами для создания сплавов со специальными физическими, химическими и механическими свойствами.

Поэтому важнейшими легирующими элементами в титановых сплавах являются: алюминий, олово, хром, медь, бор, кремний, германий, марганец, железо, которые образуют с титаном ограниченные твердые растворы, а также цирконий, ванадий, молибден и ниобий, которые образуют с титаном непрерывные твердые растворы.

1.6. Классификация диаграмм состояния двойных систем на основе титана

На рис. 1.10 приведена классификация двойных диаграмм состояния систем на основе титана [7] (представлена только левая часть двойных диаграмм состояния, т.е. со стороны титана).

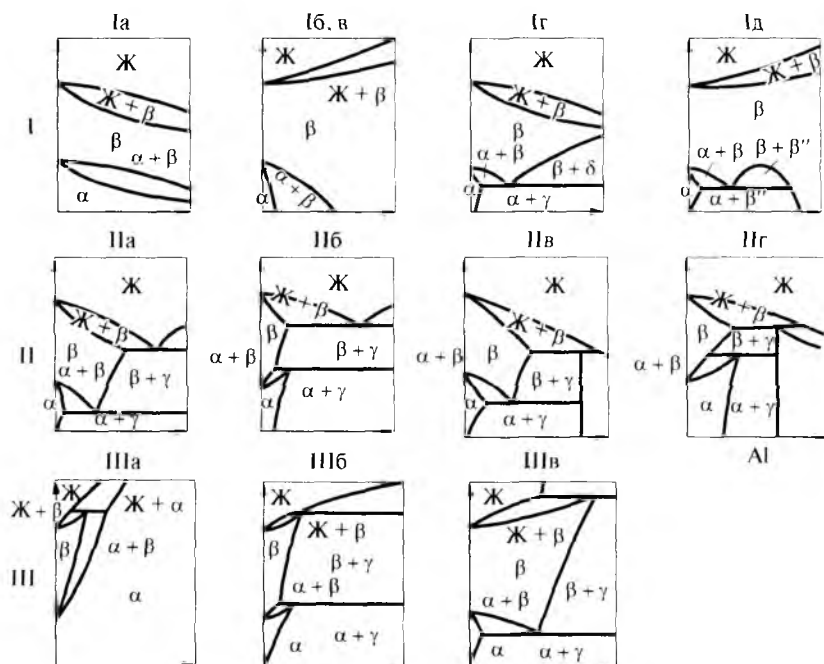


Рис. 1.10. Классификация диаграмм состояния двойных систем на основе титана

Все диаграммы разбиты на три большие группы, каждая из которых подразделяется на подгруппы по виду превращений в твердом состоянии:

Группа I — системы с непрерывным рядом β -твердых растворов, а именно: системы с ограниченной растворимостью легирующих компонентов в β -титане, которые стабилизируются при комнатной температуре и достаточно большом содержании легирующего элемента; в эту группу включены подгруппа Ia — системы с неограниченной растворимостью второго компонента в α -титане (цирконий, гафний); подгруппа Ib — системы с ограниченной растворимостью второго компонента в α -титане при наличии устойчивой β -фазы по достижении некоторой концентрации (ванадий, ниобий, тантал, молибден, рений, осмий, иридий); подгруппа Ib — системы с ограниченной растворимостью второго компонента в α -титане при наличии эвтектоидного распада β -твердого раствора с выделением химического соединения (хром, уран); подгруппа Ig —

системы с монотектоидным превращением без образования химического соединения (вольфрам).

Группа II — диаграммы состояния, в которых легирующий компонент понижает температуру плавления титана и двухфазное равновесие $\text{Ж} \leftrightarrow \beta$ завершается нонвариантным превращением эвтектического или перитектического типа. В эту группу включены диаграммы состояния, в которых легирующие компоненты образуют ограниченные твердые растворы в α - и β -титане. По характеру превращений в твердом состоянии в подгруппу IIa включены системы с эвтектическим и эвтектоидным превращениями (водород, золото, бериллий, кремний, марганец, железо, кобальт, никель, палладий, платина); в подгруппу IIб — системы с эвтектическим и перитектоидным превращениями (бор, олово, углерод, галлий, германий, лантан, церий, неодим); в подгруппу IIв — системы с перитектическим и эвтектоидным превращениями (медь, серебро, свинец, висмут), а в подгруппу IIг — системы с перитектическим и перитектоидным превращениями (алюминий).

Группа III — перитектические системы, в которых легирующий компонент повышает температуру плавления титана. Группа III содержит одну подгруппу с простой перитектикой (азот, кислород); перитектических систем с эвтектоидным превращением в титановых сплавах пока не обнаружено.

1.7. Структурная классификация титановых сплавов

Чистый титан, как уже указывалось, имеет невысокие прочностные показатели, поэтому широкое распространение получили титановые сплавы. Большинство титановых сплавов в качестве легирующего элемента содержит алюминий. С введением алюминия повышается жаропрочность титана, снижается его плотность, возрастает коррозионная стойкость. Кроме того, алюминий благоприятно влияет на литейные и технологические характеристики титана: возрастает жидкотекучесть, сплавы хорошо свариваются. Содержание алюминия в титане не должно превышать 6–8 %; в противном случае пластические характеристики титана резко падают (рис. 1.11).

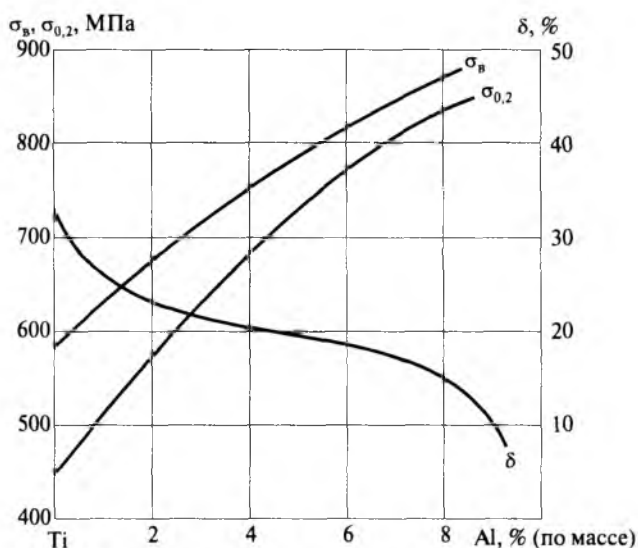


Рис. 1.11. Влияние алюминия на механические свойства титана

Снижение свойств (охрупчивание) связано с выделением фазы α_2 . Введение в титан небольшого количества элементов β -стабилизаторов препятствует образованию в сплаве фазы α_2 , что позволяет увеличить содержание алюминия в титане до 9 %.

На рис. 1.12 представлена диаграмма состояния титан—алюминий. В богатой титаном области образуются интерметаллиды Ti_3Al и $TiAl$. Интерметаллид $TiAl$ образуется при $1460^\circ C$ по перитектической реакции $\beta + \gamma \rightarrow \gamma$, где γ — твердый раствор на основе $TiAl$. При температуре $1250^\circ C$ происходит реакция $\beta + \gamma \rightarrow \alpha_2$, где α_2 — твердый раствор на основе интерметаллида Ti_3Al . При $1080^\circ C$ наблюдается еще одно перитектоидное превращение $\beta + \alpha_2 \rightarrow \alpha$. С понижением температуры растворимость алюминия в α -титане уменьшается с 11,6 % (по массе) при $1080^\circ C$ до 6 % при $550^\circ C$.

Кроме алюминия в титан вводят ванадий, цирконий, молибден, хром, кремний, марганец, олово, железо и другие элементы. Легирующие элементы, а также неизбежно попадаемые в металл примеси изменяют температуру полиморфного превращения титана. По этому признаку элементы подразделяют на три группы:

- 1) α -стабилизаторы — элементы, повышающие температуру полиморфного превращения, — алюминий, кислород, азот, углерод и др.;

- 2) β -стабилизаторы – элементы, понижающие температуру полиморфного превращения, – цирконий, ниобий, ванадий, молибден, марганец, железо, хром, кобальт и т.д.;
- 3) нейтральные легирующие элементы, практически не влияющие на температуру полиморфного превращения титана, – олово, германий и проч.

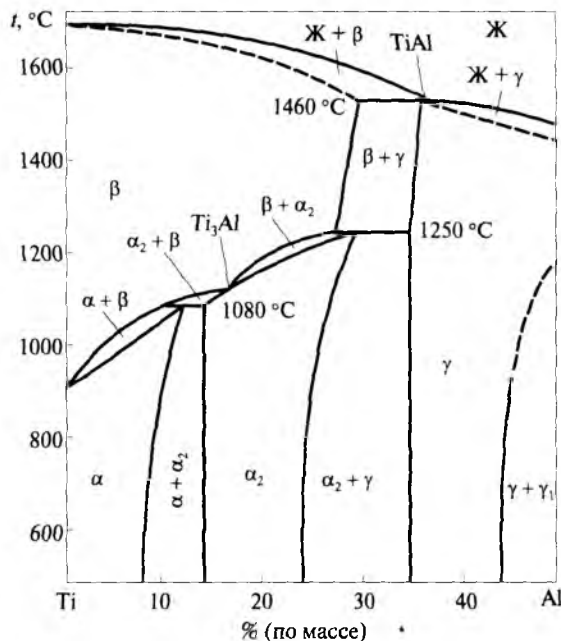


Рис. 1.12. Диаграмма состояния титан–алюминий

По уровню прочности различают сплавы: малопрочные; сплавы средней прочности и высокопрочные.

По назначению сплавы делят на конструкционные; жаропрочные; коррозионно-стойкие.

Так как свойства металла определяются структурой (фазовым составом, размерами фаз), которая в значительной степени зависит от химического состава, то для титановых сплавов принята классификация [3], которая основана на разделении всех сплавов по типу структуры, получаемой в изделиях после отжига, проводимого по промышленным режимам. Она включает:

- 1) α -сплавы, структура которых представлена α -фазой;

- 2) псевдо- α -сплавы, структура которых представлена α -фазой и небольшим количеством β -фазы (не более 5 %) или интерметаллидов;
- 3) ($\alpha + \beta$)-сплавы, структура которых представлена α - и β -фазами; сплавы этого типа также могут содержать интерметаллиды;
- 4) псевдо- β -сплавы со структурой в отожженном состоянии, β -фазой и небольшим количеством α -фазы; в этих сплавах закалкой или нормализацией из β -области можно легко получить однофазную β -структуру;
- 5) β -сплавы, структура которых представлена термически стабильной β -фазой;
- 6) сплавы на основе интерметаллидов.

Все титановые сплавы подразделяют на литейные, применяемые для изготовления фасонных отливок, и деформируемые, используемые для литья слитков.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите особенности титана по сравнению с другими широко используемыми в промышленности металлами.
2. Титан относится к группе элементов, обладающих высокой химической активностью. Однако при температуре до 500 °С титан обладает исключительно высокой коррозионной стойкостью в целом ряде агрессивных сред. Объясните этот факт.
3. Сравните удельную прочность ряда промышленных сплавов на основе железа, алюминия и магния с аналогичным показателем титановых сплавов. Объясните, почему данный показатель для титановых сплавов в 2–3 раза выше, чем у других сплавов?
4. Назовите основные недостатки титана, которые осложняют технологический процесс производства деталей из титановых сплавов и тем самым не позволяют повысить его экономическую эффективность.
5. Производство из титановых сплавов находит широкое применение в ряде отраслей промышленности. Назовите эти отрасли. Какие свойства титана этому способствуют?
6. Титан активно взаимодействует с газами атмосферы. Какие виды взаимодействия получают развитие? Как температура влияет на интенсивность взаимодействия?
7. Как атмосферные газы влияют на механические свойства титана? Назовите допустимые концентрации элементов, входящих в состав атмосферы, в промышленных титановых сплавах.

8. При определенном содержании водорода в титане (укажите его концентрацию) резко повышается хрупкость титана («гидридная хрупкость»). Объясните причину этого явления.
9. Кислород – основная примесь в титановых сплавах. Как он влияет на механические свойства титана? Назовите допустимую концентрацию кислорода в титановых сплавах.
10. Все элементы Периодической системы Д.И. Менделеева по виду взаимодействия с титаном разделяют на четыре семейства. Объясните, почему элементы, входящие в семейства 3 и 4, являются основными легирующими компонентами в титане.

ГЛАВА 2 СОСТАВ И СВОЙСТВА ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

2.1. Состав и свойства титановых сплавов

В промышленности для получения слитков используется широкая номенклатура деформируемых титановых сплавов, различающихся по химическому составу, механическим и технологическим свойствам. В табл. 2.1 представлены химические составы таких сплавов, которые отнесены к той или иной группе по фазовому составу.

Практически все титановые сплавы легированы алюминием, который повышает прочность и модуль упругости титана, снижает плотность сплава, уменьшает склонность к водородной хрупкости, улучшает технологические свойства.

Титановые α -сплавы ВТ1, ВТ5, ВТ5-1, ПТ-7М, легированные нейтральными элементами-упрочнителями – оловом и цирконием, отличаются повышенной прочностью по сравнению с титаном и жаропрочностью, высокой термической стабильностью. Они хорошо свариваются, и при сварке не возникает охрупчивание металла в зоне сварного шва. К недостаткам α -сплавов относятся их сравнительно невысокая прочность, сплавы этой группы не упрочняются термической обработкой. С увеличением содержания алюминия (более 5 % по массе) возрастают рабочие температуры титановых α -сплавов. Однако при этом возникает опасность их охрупчивания в результате выделения фазы α_2 .

Сплав ВТ5, содержащий 5 % Al, деформируется в горячем состоянии: куется, прокатывается и штампуются. Из него изготавливают прутки, поковки, трубы. Сплав хорошо сваривается. Детали из сплава ВТ5 могут работать при температурах до 400 °С.

Сплав ВТ5-1 относится к системе титан–алюминий–олово. Он более технологичен, чем ВТ5. Из него изготавливают все виды полуфабрикатов, получаемых обработкой давлением, – листы,

плиты, поковки, штамповки, профили, трубы, проволоку. Сплав предназначен для изготовления изделий, работающих в широком интервале температур — от криогенных до 450 °С. Если сплав BT5-1 используют для изготовления деталей, работающих при криогенных температурах, то содержание вредных примесей в нем должно быть сведено к минимуму, так как они вызывают хладноломкость сплава.

Таблица 2.1. Химический состав основных промышленных деформируемых титановых сплавов

Сплав	Содержание легирующих элементов, % (по массе), остальное — титан						
	Al	Zr	V	Mo	Cr	Si	Другие элементы
α-сплавы							
BT1-00	—	—	—	—	—	—	—
BT1-0	—	—	—	—	—	—	—
BT5	4.3–6.2	—	—	—	—	—	—
BT5-1	4.0–6.0	—	—	—	—	—	2.0–3.0 (Sn)
ПТ-7М	1.8–2.5	2–3	—	—	—	—	—
Псевдо-α-сплавы							
OT4-0	0.2–0.4	—	—	—	—	—	0.2–1.3 (Mn)
OT4-1	1.0–2.5	—	—	—	—	—	0.7–2.0 (Mn)
OT4	3.5–5.0	—	—	—	—	—	0.8–2.0 (Mn)
BT4	4.5–6.0	—	—	—	—	—	0.8–2.0 (Mn)
OT4-2	5.5–7.0	—	—	—	—	—	1.0–2.3 (Mn)
AT2	—	2	—	1	—	—	—
BT18	7.2–8.2	10–12	—	0.4–0.8	—	0.05–0.18	0.8–1.2 (Nb); 0.15 (Fe)
BT20	5.5–7.0	1.4–2.5	0.8–2.3	0.5–1.8	—	—	—
ПТЗВ	3.5–5.0	—	1.5–2.5	—	—	—	—
ТС5	5.0	2.0	2.0	—	—	—	3 (Sn)
AT3	2.5–3.5	—	—	—	0.2–0.5	0.2–0.4	0.2–0.5 (Fe)
AT4	3.5–5.0	—	—	—	—	—	1.5 (Fe, Cr, Si)

Окончание табл. 2.1

Сплав	Содержание легирующих элементов, % (по массе), остальное – титан						
	Al	Zr	V	Mo	Cr	Si	Другие элементы
(α + β)-сплавы							
BT6	5,3–6,8	—	3,5–5,3	—	—	—	—
BT6C	5,3–6,5	—	3,5–4,5	—	—	—	—
BT14	3,5–6,3	—	0,9–1,9	2,5–3,8	—	—	—
BT16	1,6–3,8	—	4,0–5,0	4,5–5,5	—	—	—
BT3-1	5,5–6,5	—	—	2–3	0,8–2,3	0,2–0,4	0,2–0,7 (Fe)
BT8	6,0–7,3	—	—	2,8–3,8	—	0,2–0,4	—
BT9	5,8–7,0	0,8–2,5	—	2,8–3,8	—	0,2–0,35	—
BT23	4,0–6,2	—	4–5	1,5–2,5	0,8–1,4	—	0,4–0,6 (Fe)
BT22	4,5–5,9	—	4,0–5,0	4,0–5,5	0,5–2,0	—	0,5–1,5 (Fe)
Псевдо-β-сплавы							
BT30	—	5,5	—	11	—	—	4,5 (Sn)
BT15	2,3–3,5	—	—	6,5–7,5	9,5–11,5	—	—
TC6	3	—	6	5	11	—	—
β-сплавы							
4201	—	—	—	33	—	—	—

Сплав *ПТ-7М*, содержащий 2,25 % алюминия и 2,5 % циркония, предназначен в основном для производства труб.

Титановые псевдо-α-сплавы кроме алюминия содержат немного элементов – β-стабилизаторов, которые препятствуют образованию в сплаве фазы α₂, приводящей к охрупчиванию металла. В качестве β-стабилизаторов используют ванадий, молибден, ниобий, марганец, железо. Псевдо-α-сплавы, легированные алюминием и β-стабилизаторами, можно дополнительно упрочнить легированием нейтральными элементами – оловом и цирконием. Псевдо-α-сплавы при одинаковой с α-сплавами пластичности обладают на 10–20 % более высокой прочностью, что обусловлено существенным измельчением зерна при переходе от α- к (α + β)-структуре.

При комнатной температуре у псевдо- α -сплавов технологическая пластичность выше, чем у α -сплавов, в связи с положительным влиянием β -фазы на способность металла к пластической деформации, что обусловлено объемно-центрированной кубической решеткой β -фазы.

Если структура α -сплавов остается однофазной при нагреве металла до температуры полиморфного превращения, то в псевдо- α -сплавах с повышением температуры количество β -фазы непрерывно увеличивается. Поэтому преимущество псевдо- α -сплавов перед α -сплавами по пластичности возрастает с повышением температуры. Псевдо- α -сплавы отличаются высокой термической стабильностью, хорошей свариваемостью. В связи с высокой технологической пластичностью псевдо- α -сплавы оказались особенно пригодными для производства листовых полуфабрикатов и изделий из них.

Существенный недостаток псевдо- α -сплавов — их высокая склонность к водородной хрупкости.

В табл. 2.1 представлены химические составы титановых псевдо- α -сплавов. Сплавы системы титан—алюминий—марганец ОТ4-0, ОТ4-1, ОТ4, ВТ4, ОТ4-2 обладают хорошей технологической пластичностью, хорошо деформируются в горячем и холодном состояниях. В основном они предназначены для изготовления лент, листов и полос; из них также получают поковки, прутки, трубы и профили. Сплавы хорошо свариваются. Недостатками этих сплавов являются сравнительно невысокие прочность и жаропрочность, а также высокая склонность к водородной хрупкости.

Сплавы ВТ20, ВТ18 и ТС5 содержат β -стабилизаторы и нейтральные элементы — упрочнители.

Сплав ВТ20 отличается высокой жаропрочностью, хорошо сваривается. Из сплава изготавливают листы. Изделия из сплава ВТ20 могут длительное время работать при температурах до 500 °С.

Сплав ВТ18 относится к наиболее жаропрочным титановым сплавам, он может работать длительное время при температурах 550–600 °С. Высокая жаропрочность сплава обусловлена большим содержанием в нем алюминия и циркония. Из сплава ВТ18 изготавливают прутки, поковки и штамповки.

Сплавы типа АТ2 обладают высокой пластичностью и ударной вязкостью при криогенных температурах.

Титановые ($\alpha + \beta$)-сплавы отличаются наиболее благоприятным сочетанием механических и технологических свойств. Эти сплавы характеризуются лучшей технологической пластичностью, чем α -сплавы, высокой прочностью, способностью упрочняться термической обработкой, меньшей склонностью к водородной хрупкости по сравнению с α - и псевдо- α -сплавами.

Для фиксации β -фазы при комнатной температуре в эти сплавы вводят β -стабилизаторы, которые хорошо растворяются в β -фазе и упрочняют ее. Растворимость β -стабилизаторов в α -фазе мала и поэтому они слабо ее упрочняют. В связи с этим в ($\alpha + \beta$)-сплавы вводят алюминий, который хорошо растворяется в α -фазе и упрочняет ее.

Отличие от α - и псевдо- α -сплавов ($\alpha + \beta$)-сплавы существенно упрочняются в результате закалки и старения.

Механические свойства отожженных ($\alpha + \beta$)-сплавов зависят от вида микроструктуры. Так, для сплавов с зернистой (равноосной) структурой характерны высокая прочность, пластичность и технологичность. Сплавы с пластинчатой структурой отличаются высокой ударной вязкостью и жаропрочностью.

Химический состав и механические свойства основных ($\alpha + \beta$)-сплавов приведены в табл. 2.1, 2.2.

Сплав ВТ6 является наиболее распространенным и по химическому составу относится к системе титан–алюминий–ванадий. Алюминий повышает прочность и жаропрочность сплава, а ванадий — его прочность и пластичность. Важное преимущество сплава ВТ6 перед другими ($\alpha + \beta$)-сплавами — хорошая свариваемость. После сварки для восстановления пластичности сварные соединения необходимо отжигать при 700–800 °С. Сплав ВТ6 упрочняется термической обработкой. Например, после закалки с температуры 900–950 °С временное сопротивление разрыву сплава ВТ6 составляет 1000–1100 МПа, а после старения при 450–555 °С в течение 2–8 ч — 1200–1300 МПа.

Из сплава ВТ6 изготавливают листы, прутки, трубы, профили, поковки и штамповки.

Сплавы ВТ14 и ВТ16, относящиеся к системе титан–алюминий–молибден–ванадий, в отожженном состоянии имеют двухфазную ($\alpha + \beta$)-структуру.

Сплав ВТ16 содержит меньше алюминия и больше β -стабилизаторов, чем сплав ВТ14. Поэтому в структуре сплава ВТ16 в отожженном состоянии β -фаза составляет 25–30 %, а в сплаве ВТ14 — 10 %. Благодаря высокому содержанию β -фазы сплав ВТ16 обладает высокой технологической пластичностью. Основным видом полуфабриката из этого сплава — пруток диаметром от 4 до 20 мм, из которого изготавливают главным образом детали крепления — болты, винты, заклепки и т.п.

Сплав ВТ22 в связи с высоким содержанием β -стабилизаторов имеет структуру с примерно равными количествами α - и β -фаз, поэтому он относится к самым прочным титановым сплавам в отожженном состоянии. Его прочностные свойства в отожженном состоянии такие же, как у сплавов ВТ6, ВТ14 после закалки и старения. Сплав ВТ22 предназначен для изготовления поковок, штамповок, прутков, профилей, труб, плит. Из сплава ВТ22 изготавливают высоконагруженные детали и конструкции, длительно работающие до температур 350–400 °С.

Сплав ВТ23 отличается высокой технологической пластичностью, что позволяет при изготовлении из него деталей применять вытяжку, отбортовку и другие операции обработки давлением. Хорошо подвергается ковке и штамповке.

Сплавы ВТ8 и ВТ9 относятся к системе титан—алюминий—ванадий, в которые введены кремний и цирконий для повышения жаропрочности (см. табл. 2.1). Структура сплавов в отожженном состоянии представлена α -фазой, β -фазой (10 %) и небольшим количеством дисперсных силицидов.

Сплав ВТ8 обладает высокой термической стабильностью и удовлетворительной пластичностью; он плохо сваривается, недостаточно технологичен и используется в основном в качестве ковочного материала. Изделия из этого сплава могут работать при температурах до 450–500 °С.

В сплаве ВТ9 содержание циркония выше, чем в сплаве ВТ8, что приводит к росту прочности. Сплав ВТ9 более жаропрочен, чем другие ($\alpha + \beta$)-сплавы, и может работать до 500–550 °С.

Сплав ВТ3-1 относится к системе титан—алюминий—хром—молибден—железо—кремний. После изотермического отжига содержание β -фазы в структуре сплава составляет около 15 %. Сплав ВТ3-1 — наиболее освоенный в производстве. Он относится к

группе жаропрочных и может длительно работать при 400–450 °С. Из сплава ВТЗ-1 изготавливают прутки, профили, плиты, поковки, штамповки.

Псевдо-β-сплавы относятся к высоколегированным титановым сплавам, в которых суммарное содержание легирующих элементов доходит до 20 % и более. Эти сплавы легируют β-стабилизаторами.

При закалке сплавов из β-области их структура состоит только из β-фазы, но она термически нестабильна и при старении выделяются дисперсные включения α-фазы. К преимуществам псевдо-β-сплавов относятся:

- › высокая технологическая пластичность в закаленном состоянии. Это связано с тем, что β-фаза с объемно-центрированной кубической решеткой по своей природе более пластична, чем гексагональная α-фаза. В закаленном состоянии сплавы обрабатываются давлением. Листы из них хорошо подвергаются штамповке;
- › в 1,5–1,7 раза более высокая прочность в результате термического упрочнения при старении;
- › малая склонность к водородной хрупкости.

Недостатками псевдо-β-сплавов являются: невысокая термическая стабильность, в результате чего их нельзя применять для длительной работы при температурах выше 300 °С; неудовлетворительная свариваемость; склонность к зональной ликвации при изготовлении слитков, что вызывает неоднородность механических свойств готовой продукции; повышенная плотность (5,0–5,1 г/см³).

На свойства псевдо-β-сплавов примеси внедрения (кислород, азот, углерод и др.) оказывают большее влияние, чем на свойства α- и (α + β)-сплавов. Примеси отрицательно влияют на пластичность сплавов, поэтому их содержание в них должно быть более строго регламентировано, чем в α- и (α + β)-сплавах.

Сплав ВТ15 является представителем этой группы сплавов и содержит 3 % алюминия, 7 % молибдена, 11 % хрома. Из сплава ВТ15 изготавливают листы, ленты, фольгу, штамповки, поковки, прутки и профили. В закаленном состоянии сплав ВТ15 отличается невысокой прочностью, большой пластичностью ($\sigma_B = 880\text{--}1000$ МПа, $\delta = 12\text{--}20$ %). После термического упрочнения старением по режиму 25 ч при 480–500 °С + 15 мин при 550–570 °С

временное сопротивление разрыву составляет 1300–1500 МПа при удлинении 6 %.

Титановые β -сплавы с термодинамически устойчивой β -фазой можно получить путем легирования β -стабилизаторами, которые имеют объемно-центрированную кубическую решетку, а при комнатной температуре образуют с β -титаном непрерывный ряд твердых растворов. К таким элементам относятся ванадий, молибден, ниобий и тантал. Однако стабильная β -фаза в данных сплавах образуется при высоких концентрациях легирующих компонентов. При этом титановые сплавы теряют свое основное преимущество – сравнительно малую плотность. Сплавы со стабильной β -фазой не получили широкого промышленного применения.

Сплав 4201 (Ti + 33 % Mo) производят в полупромышленном масштабе; он отличается высокой технологической пластичностью, хорошей свариваемостью, высокой коррозионной стойкостью. Из него изготавливают полуфабрикаты – листы, ленты, фольгу, плиты, поковки, штамповки, трубы, профили.

В табл. 2.2 представлены стандартные механические свойства некоторых промышленных титановых деформируемых сплавов.

Таблица 2.2. Стандартные механические свойства некоторых промышленных титановых деформируемых сплавов

Марка сплава	Структура	Вид полуфабриката	Вид термообработки	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %
BT5	α -сплавы	Профиль	Отжиг	750–950	8–16
BT-1	α -сплавы	Штамповки	То же	750–950	10
OT4-0	Псевдо- α -сплавы	Листы	—>—	500–650	30
OT4	Псевдо- α -сплавы	То же	—>—	700–900	10–20
BT4	Псевдо- α -сплавы	—>—	—>—	850–1000	12
BT20	Псевдо- α -сплавы	Листы, прутки	—>—	900–1100	7–13
AT4	Псевдо- α -сплавы	Листы	—>—	850–1050	10
BT6	($\alpha + \beta$)-сплавы	Листы, штамповки	—>—	950–1100	8–13

Окончание табл. 2.2

Марка сплава	Структура	Вид полуфабриката	Вид термообработки	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %
BT14	$(\alpha + \beta)$ -сплавы	Листы	—>—	930–1100	10
BT22	$(\alpha + \beta)$ -сплавы	Прутки	Отжиг, закалка и старение	1100–1250 1400–1550	8 5
BT9	$(\alpha + \beta)$ -сплавы	Штамповки	Отжиг	1100–1300	8–14
BT15	Псевдо- β -сплавы	Листы	Закалка, закалка и старение	880–1020 1350–1500	12–25 4
ТС6	Псевдо- β -сплавы	Листы	Закалка и старение	1400–1500	4

2.2. Перспективные титановые сплавы

Сплавы на основе интерметаллидов обладают комплексом свойств, благодаря которым они являются весьма перспективными конструкционными материалами для новейших отраслей машиностроения. Однако пока эти сплавы не находят широкого промышленного использования из-за низких технологических свойств и относительно высокой стоимости.

На основе интерметаллидов титана находят применение сплавы, которые можно разделить на две группы – 1) жаропрочные и 2) с «эффектом памяти формы».

К группе жаропрочных сплавов относятся сплавы: Ti_3Al и TiAl на основе алюминидов титана (см. рис. 1.12).

Сплавы на основе Ti_3Al (фаза α_2) по удельной жаропрочности и модулю упругости превосходят лучшие промышленные жаропрочные титановые сплавы. До температур 700–750 °С они могут конкурировать со сталями и никелевыми сплавами.

При разработке сплавов на основе Ti_3Al основной системой легирования является $\text{Ti}_3\text{Al}-\text{Nb}$. Улучшение комплекса свойств достигается легированием Mo, V, W, Zr, Ta. Лучшим зарубежным (США) промышленным сплавом этого типа является сплав «супер- α_2 » состава $\text{Ti}-15\text{Al}-20\text{Nb}-3\text{V}-2\text{Mo}$ (масс. %). Из россий-

ских сплавов наиболее известны ВТП-1 ($\text{Ti}-14,5\text{Al}-22\text{Nb}-1,5\text{Zr}-0,25\text{Si}$) и ВТИ-50 ($\text{Ti}-15\text{Al}-24\text{Nb}-1,5\text{Mo}-1,5\text{Zr}$). Невысокая пластичность этих сплавов делает технологический процесс производства деформированных полуфабрикатов довольно сложным и дорогостоящим, что затрудняет его использование в промышленных масштабах.

Новый сплав 7115, разработанный на основе Ti_3Al (патент РФ 2081929) в МАТИ им. К.Э. Циолковского, имеет состав: $\text{Ti}-14\text{Al}-3\text{Nb}-3\text{V}-0,5\text{Zr}$. В результате резкого снижения содержания ниобия плотность сплава уменьшена до $4,3 \text{ г/см}^3$, одновременно повышена жаропрочность и понижена стоимость сплава.

Если применять для данного сплава термоводородную обработку, удастся существенно повысить технологическую пластичность сплава, что позволяет производить горячую деформацию при температуре на $150-200^\circ\text{C}$ ниже, чем для сплавов типа «супер- α_2 ».

Термоводородная обработка включает в себя три основные операции: 1) введение водорода в сплав до заданной концентрации; 2) термическое воздействие на металл; 3) вакуумный отжиг. В частности, при введении $0,4-0,5\%$ (масс.) водорода в сплав 7115 доля пластичной β -фазы в структуре сплава при температуре 900°C возрастает до 60% , что повышает пластичность сплава.

Сплавы на основе TiAl (γ -фаза) отличаются малой плотностью ($3,7 \text{ г/см}^3$), высокими литейными свойствами, жаропрочностью и жаростойкостью. По жаропрочности эти сплавы могут конкурировать с никелевыми. Промышленному их использованию препятствует хрупкость.

В табл. 2.3 приведены сведения о некоторых свойствах сплавов на основе алюминидов титана, титановых и никелевых жаропрочных сплавов, из которых следует, что по ряду позиций жаропрочные сплавы на основе Ti_3Al и TiAl превосходят титановые сплавы и совсем немного уступают тяжелым никелевым жаропрочным сплавам (плотность никеля $8,907 \text{ г/см}^3$).

Основу сплавов второй группы составляет интерметаллид TiNi . Сплав «нитинол» на основе TiNi обладает уникальной (для интерметаллидов) способностью к пластической деформации в холодном состоянии и способен воспроизводить заданную форму изделия при определенном тепловом воздействии.

Таблица 2.3. Свойства сплавов на основе алюминидов титана, титановых и никелевых жаропрочных сплавов

Показатель	Сплавы			
	Титановые	На основе Ti_3Al	На основе $TiAl$	Жаропрочные никелевые
Плотность, г/см ³	4,5	4,3–4,7	3,7–3,9	8,3
Модуль упругости, ГПа	96–100	100–145	160–176	206
Предел прочности, МПа	480–1200	800–1140	450–800	800–130
Предел текучести, МПа	380–1150	700–990	400–650	700–1100
Предельная рабочая температура, °С	650	650–760	900–1000	1090
Относительное удлинение, %				
при комнатной температуре	20	2–10	1–4	3–5
при высоких температурах	Высокая	10–20	10–60	10–20

Это явление, названное «эффект памяти формы», основано на мартенситном превращении, протекающем в сплаве при изменении температуры. Например, если прямой кусок проволоки из «нитинола» нагреть выше температуры прямого мартенситного превращения, а затем охладить до комнатной температуры, свернуть проволоку в спираль и снова нагреть до температуры выше температуры обратного мартенситного превращения, то спираль вновь примет форму прямой проволоки. Сплав «нитинол» $TiNi$ содержит по массе 53,5 % Ti и 56,5 % Ni . Температура прямого мартенситного превращения этого сплава находится в пределах от -20 до 50 °С. Обратное мартенситное превращение протекает при высоких температурах. Сплав $TiNiK$, дополнительно содержащий 3 % Fe , имеет криогенную температуру прямого мартенситного превращения, а обратное мартенситное превращение получает развитие при комнатной температуре.

Сплавы «нитинол» находят применение в различных отраслях машиностроения, например для термомеханического соединения трубопроводов в авиационных конструкциях, при установке заклепок в труднодоступных местах, в космической технике, меди-

цине. «Эффектом запоминания формы» обладают и другие титановые сплавы. Однако сплавы «нитинол» обладают самым высоким комплексом свойств «эффекта запоминания формы».

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Деформируемые титановые сплавы по фазовому составу подразделяют на ряд групп. Назовите эти группы. Какие легирующие элементы являются основными в этих группах?
2. Назовите основные достоинства и недостатки α -титановых сплавов. Укажите область их применения.
3. Объясните причину повышения механических свойств псевдо- α -титановых сплавов по сравнению с α -сплавами. Какая продукция чаще всего изготавливается из титановых сплавов, входящих в эту группу?
4. Титановые ($\alpha + \beta$)-сплавы отличаются наиболее благоприятным сочетанием механических и технологических свойств. Объясните этот факт. Какая продукция изготавливается из сплавов этой группы?
5. Почему ряд промышленных сплавов, по фазовому составу относящихся к группе псевдо- β -сплавов, обладает достаточно высокими жаропрочными свойствами?
6. Перечислите достоинства и недостатки титановых промышленных сплавов, входящих в группы β -сплавов и псевдо- β -сплавов.
7. Перечислите достоинства и недостатки титановых сплавов на основе интерметаллидов: Ti₃Al, TiAl и TiN.

ГЛАВА 3 ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ
СЛИТКОВ**3.1. Особенности технологического процесса
плавки при литье слитков**

Конструкционные материалы из титановых сплавов широко используются в изделиях и машинах новой техники. Большую часть титановых конструкционных материалов изготавливают из деформированных полуфабрикатов — листов, поковок, прутков, штамповок, труб и т.д.

Исходной заготовкой для их получения является слиток. Качество конечной продукции, эффективность всего цикла получения готовых деталей обработкой давлением в значительной мере определяются уровнем развития теории и технологии слиткового литья. Советскими учеными В.И. Добаткиным, И.Ф. Аношкиным, В.А. Ливановым, Е.И. Морозовым, С.Г. Глазуновым, Б.А. Колачевым и др. разработана теория слиткового литья, и на ее основе созданы эффективные технологические процессы производства высококачественных титановых слитков, сконструированы и изготовлены специальные виды технологического оборудования — вакуумно-дуговые, электронно-лучевые, плазменные плавильно-литейные установки, гарнисажные плавильные печи, установки для сварки электродов, ультразвуковые установки для контроля качества слитков и т.д.

Традиционная схема технологического процесса производства слитков из большинства конструкционных сплавов включает следующие основные этапы: подготовка шихты к плавке, ее расплавление, приготовление рабочего сплава, формирова-

ние слитка. В зависимости от марки сплава изготовленные слитки подвергаются механической и термической обработке, контролируется их качество.

Слитки получают путем либо разовой заливки расплава в металлические изложницы (производство слитков в изложницах), либо непрерывной подачи жидкого металла в кристаллизаторы с последующим вытягиванием из него слитка (производство слитков непрерывным и полунепрерывным методами). В обоих случаях жидкий металл должен быть накоплен в определенных количествах в плавильной печи, тигле, миксере и затем направлен на разливку в изложницы или на установки непрерывного литья слитков.

При изготовлении слитков из титановых сплавов подобный технологический процесс не может быть осуществлен в полной мере, так как у титана и его сплавов при высоких температурах (выше 600–800 °С) и особенно в жидком состоянии чрезвычайно высока химическая активность и по этой причине они очень энергично вступают в химическое взаимодействие практически со всеми известными простыми и сложными по химическому составу веществами. Продукты реакций растворяются в металле и вызывают резкое изменение структуры и физико-химических свойств металла, который становится непригодным для изготовления конструкционных материалов. Достаточно указать, что даже при небольшом содержании примесей (например, азота – более 0,1 %, кислорода – более 0,2 %, водорода – более 0,015 % и т.д.) титановые сплавы становятся совершенно непригодны для изготовления конструкционных деталей.

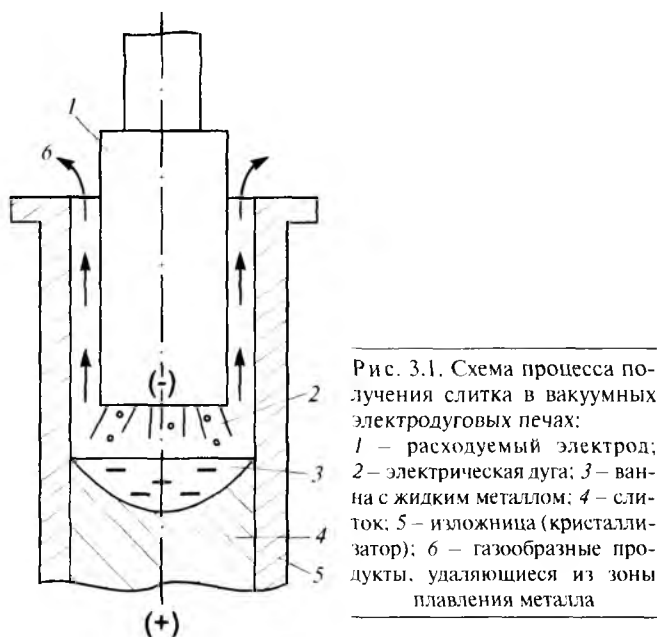
Эта особенность титановых сплавов выдвигает ряд специфических требований к технологическому процессу производства слитков. Сущность их сводится к обеспечению таких условий на всех этапах технологического производства слитков, при которых исключалось бы химическое взаимодействие металла с газами атмосферы и материалами, непосредственно контактирующими с жидким и нагретым до высоких температур затвердевшим металлом – материалом изложницы, плавильного тигля и т.д.

Взаимодействие титановых сплавов с газами атмосферы на всех этапах технологического процесса (нагрев и расплавление шихты, приготовление сплава, разливка, формирование слитка) исключается либо путем проведения этих операций в вакууме

(давление 13,3 Па), либо в нейтральной по отношению к титану среде, например в атмосфере химически чистых инертных газов.

Химическое взаимодействие с материалом тигля, изложницы, кристаллизатора практически полностью исключается при использовании вакуумных плавильно-литейных агрегатов, в которых слиток получают путем либо переплавки расходуемого электрода в изложнице (кристаллизаторе), либо наплавления металла в гарнисажном тигле с последующим его сливом в изложницу для получения слитка.

На рис. 3.1 показана схема процесса производства слитка путем переплавки расходуемого электрода в изложнице. Процессы плавки шихтовых материалов и приготовление сплава совмещены с процессом формирования слитка.



При данной технологической схеме заранее приготовленный из кусковых шихтовых материалов методом прессования (или каким-либо другим) расходуемый электрод 1 плавится электрической дугой 2 и расплавленный металл стекает в жидкую ванну 3, находящуюся на поверхности слитка 4. В течение всего процесса

плавки длина выплавляемого слитка непрерывно увеличивается до номинальной.

В качестве источника теплоты для нагрева торцевой поверхности расходующего электрода кроме электрической дуги используют также электронный луч, поток низкотемпературной плазмы, электрическую дугу, горящую в нейтральном по отношению к титану жидком шлаке (электрошлаковая плавка).

Жидкий металл в процессе производства слитка непосредственно контактирует только с разреженной атмосферой (открытая поверхность ванны с жидким металлом) и затвердевшим металлом слитка (донная часть ванны). Такая схема технологического процесса производства слитка по сравнению с традиционной практически полностью исключает насыщение титановых сплавов примесями в процессе плавки и формирования слитка.

Однако и при данной технологической схеме производства слитков имеются источники, которые могут вызвать недопустимое загрязнение сплавов примесями:

- ◇ низкое качество исходных шихтовых материалов, используемых для изготовления расходующих электродов, так как в таком случае все примеси, содержащиеся в шихте, при переплавке переходят в слиток;
- ◇ повышенное давление воздуха в плавильной камере печи в период плавки, что приводит к повышенному содержанию в слитке элементов, содержащихся в воздухе, — кислорода, азота, водорода. Основная причина недостаточного разрежения — плохая работа вакуумных насосов или недостаточная герметичность камеры печи.

Принцип и сущность гарнисажной плавки рассмотрены в гл. 7. Источниками загрязнения металла примесями при гарнисажной плавке являются некачественная шихта и увеличенное давление в камере печи по сравнению с номинальным.

3.2. Конструкция вакуумных электродуговых печей

Для промышленного производства слитков из титановых сплавов наибольшее распространение получила вакуумная электродуговая плавка расходующего электрода. Кроме того,

применяются электронно-лучевая, плазменная, электрошлаковая плавка расходуемого электрода и гарнисажная плавка.

В современных вакуумных электродуговых печах получают титановые слитки массой около 30 т, длиной до 5 м, диаметром 1250 мм требуемого качества. Конструкция печи и сам процесс плавки отличаются относительной простотой и надежностью.

Для данного способа характерны следующие недостатки.

Во-первых, электродуговая плавка не обеспечивает после переплавки расходуемого электрода получения однородного по химическому составу слитка из-за ограниченного объема ванны жидкого металла и порционного прессования расходуемого электрода. Поэтому полученный слиток обязательно подвергается повторной переплавке. При повторной плавке в качестве расходуемого электрода используют слиток первого перепада. Слиток второго перепада имеет однородный химический состав и после ряда технологических операций (механическая обработка, промывка, контроль и др.) направляется на обработку давлением.

Во-вторых, при вакуумной дуговой плавке не удастся ввести в перепад много оборотных отходов. Расходуемый электрод для первого перепада прессуется из шихты, состоящей из титановой губки, лигатур и отходов. При содержании отходов в шихте выше 25–30 % расходуемый электрод не приобретает необходимой прочности при прессовании. Это приводит к накоплению отходов из дорогостоящих титановых сплавов на металлургических предприятиях.

Промышленное применение находят различные марки вакуумно-дуговых печей – ДСВ, ДТВ, ВД и др., которые различаются компоновкой отдельных элементов печи, порядком загрузки в печь расходуемого электрода и выгрузки слитка, габаритными размерами, производительностью. Однако принцип плавления и формирования слитка во всех печах одинаков, и они имеют такие общие элементы, как вакуумная камера, изложница (кристаллизатор), поддон, электрододержатель, система охлаждения, вакуумная система, источники питания электрической энергией, контрольно-измерительная аппаратура, механизмы для перемещения электрододержателя, поддона и др.

Наибольшее распространение как для первого, так и для второго перепадов получили вакуумно-дуговые печи с формирова-

нием слитка в медной водоохлаждаемой изложнице («глухом» кристаллизаторе). Конструкция такой печи показана на рис. 3.2.

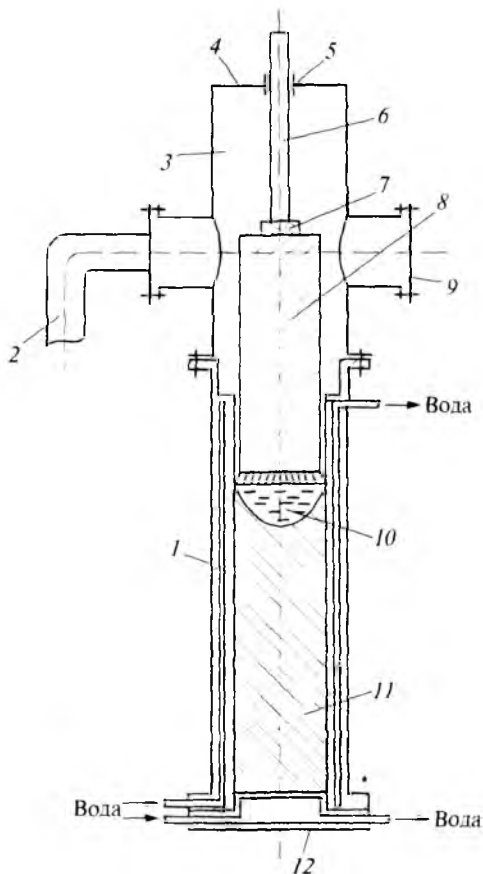


Рис. 3.2. Конструкция вакуумной дуговой печи (ДСВ)

Слиток 11 формируется в изложнице 1 за счет плавления расходуемого электрода 8 электрической дугой, горящей между расходуемым электродом и ванной жидкого металла 10. Расходуемый электрод 8 приварен к титановому огарку 7 — остатку расходуемого электрода от предыдущей плавки, который закреплен на нижнем конце электрододержателя 6 с помощью резьбового соединения. Электрододержатель проходит через вакуумное уплотнение в крышке 4 вакуумной камеры печи 3 и соединяется своим верхним концом с механизмом перемещения электрододержателя. Меха-

низм может перемещать электрододержатель и расходуемый электрод в нужном направлении (вверх или вниз) и с заданной скоростью. Вакуумная камера имеет люк 9 для осмотра качества приварки расходуемого электрода, чистки камеры печи и замены титанового огарка. В камеру печи вмонтирован вакуумпровод 2, соединяющий камеру печи с вакуумной системой. Электрододержатель печи соединен с отрицательным полюсом источника питания гибкими алюминиевыми шинами. Изложница 1 снизу закрыта поддоном 12, который с помощью специального механизма может отсоединяться от изложницы и опускаться вниз. При снятом поддоне осуществляются выгрузка из печи выплавленного слитка и загрузка в печь расходуемого электрода 8. Поддон и изложница соединены с положительным полюсом источника питания. Печь помещается в специальную защитную камеру, так как при несоблюдении требований техники безопасности и нарушении режима плавки может возникать взрывоопасная обстановка. Пульт управления печи вынесен за пределы защитного кожуха.

Самая важная и основная часть печи — изложница, где происходят расплавление расходуемого электрода с помощью электрической дуги и формирование слитка. Изложница работает в тяжелых и сложных условиях, испытывая большие тепловые нагрузки. В стенках изложницы возникают значительные температурные перепады. В зоне горения дуги удельный тепловой поток от слитка к изложнице превышает 1000 кВт/м^2 . Образующиеся по этой причине в стенках изложницы высокие термические напряжения могут вызвать ее деформацию и вывести из строя, чему способствует также разница давлений между внешней поверхностью изложницы (атмосферное давление) и внутренней (вакуум). В связи с этим изложница должна обеспечивать отвод от зоны горения дуги большого количества теплоты, обладать высокой надежностью и простотой конструкции для удобства эксплуатации и ремонта.

Данным требованиям удовлетворяет изложница, конструкция которой представлена на рис. 3.3. Кристаллизатор изложницы 1, изготовленный из меди или медных сплавов с толщиной стенки до 30–50 мм, через резиновые уплотнения соединен с корпусом 2 и фланцем 3 изложницы. Между кристаллизатором и корпусом имеется полость, по которой с заданной скоростью проходит вода для охлаждения кристаллизатора. Благодаря высокой теплопроводности меди и охлаждению внутренней полости кристаллизато-

ра водой изложница отводит от зоны плавки тепловой поток большой мощности. С помощью фланца 3 изложница через резиновое уплотнение присоединяется к фланцу камеры печи.

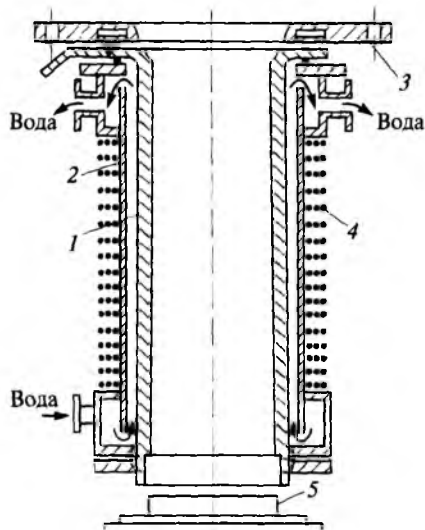


Рис. 3.3. Конструкция изложницы (кристаллизатора) вакуумной дуговой печи

На корпус изложницы намотана из медных или алюминиевых проводов катушка соленоида 4, которая создает переменное магнитное поле, интенсивно перемешивающее жидкий металл в ванне. Перемешивание способствует растворению легирующих компонентов и выравнивает химический состав сплава в ванне с жидким расплавом.

Рабочая часть поддона 5 выполняется из меди или медных сплавов. Снизу поддон закрыт стальной крышкой. Рабочая часть поддона охлаждается водой, проходящей через полость между крышкой и рабочей частью поддона.

Вакуумная система электродуговых печей выполняет две функции — откачивает воздух из камеры печи до начала плавки и удаляет газы, выделяющиеся из металла в процессе плавки, и воздух, попадающий в камеру печи из-за ее недостаточной герметичности.

Установлено, что для получения металла, не загрязненного элементами, входящими в состав воздуха, давление газов в зоне горения дуги должно быть около 13,3 Па, а в камере печи не менее 1,33 Па.

По требуемому давлению и известному количеству выделяющихся из металла газов с учетом натекания воздуха через несплошности камеры печи рассчитывают и подбирают вакуумные насосы нужной производительности и обеспечивающие необходимое разрежение в камере печи. При этом производительность вакуумных насосов для печей первого перепада должна быть в 1,5 раза выше, чем у печей, используемых для второго перепада. Это обусловлено интенсивным газовыделением при плавке расходуемого электрода из титановой губки, так как титановая губка содержит до 0,2 % (вес.) хлористого магния, некоторое количество магния и других летучих веществ.

Наиболее распространенная современная вакуумная система, схема которой представлена на рис. 3.4, состоит из механического плунжерного насоса предварительной откачки 1 серии ВН (ВН-6, ВН-300), механического бустерного вакуумного насоса 10 серии ДВН заданной производительности (ДВН-500, 2ДВН-1500), пылеулавливающей ловушки 6, вакуум-проводов 5, а также сильфонных компенсаторов 4, задвижек 3, вентилей 2, 7, датчиков для измерения вакуума 9, манометров 8.

Для горения дуги применяют постоянный электрический ток, так как переменный ток промышленной и повышенной частоты не обеспечивает стабильного горения электрической дуги в вакууме. Современные источники питания постоянного тока работают на полупроводниковых выпрямителях.

В отечественной промышленности находят применение вакуумные дуговые печи с плавкой расходуемого электрода типов ДСВ-5, ДТВ, ВД-11.

На смену малопроизводительным печам типа ДСВ-5, конструкция которой представлена на рис. 3.2, разработаны печи серии ДТВ для производства слитков длиной 5 м и массой 6, 10 и 26 т. Технические характеристики печей представлены в табл. 3.1.

Повышение производительности печей типа ДТВ достигнуто внесением некоторых изменений в конструкцию печи, основное из которых – изменение способа загрузки расходуемого электрода в печь и выгрузки слитка. В печах типа ДСВ (рис. 3.2) слиток извлекается из изложницы вместе с опускающимся поддоном. Изложница неподвижна и жестко закреплена с камерой печи. Загрузка электрода в печь производится в обратном порядке. Такая

схема выгрузки и загрузки слитков и электрода усложняет конструкцию печи и увеличивает ее высоту.

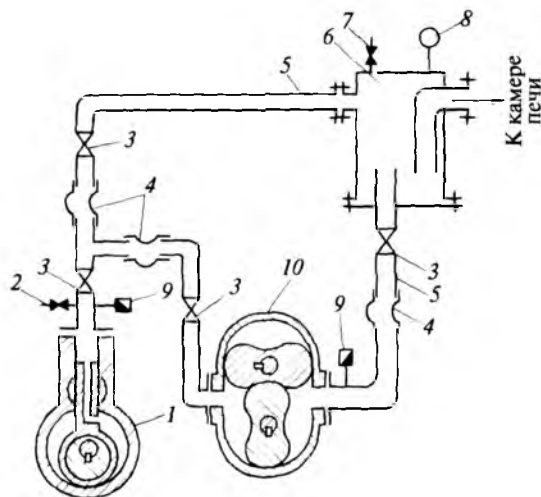


Рис. 3.4. Схема вакуумной системы вакуумных дуговых печей:

1 – механический плунжерный насос; 2, 7 – вентили; 3 – задвижка; 4 – сильфонный компенсатор; 5 – вакуум-провод; 6 – пылеулавливающая ловушка; 8 – манометр; 9 – датчик; 10 – механический бустерный вакуумный насос

Таблица 3.1. Техническая характеристика печей серии ДТВ

Характеристика	ДТВ-6, 5-Г6	ДТВ-8, 7-Г10, 6ДТВ10Г10	ДТВ-14-Г26
Диаметр кристаллизатора, мм	360	670	870
	450	770	1000
	560	870	1120
	650	1000	1400
Максимальная длина расходуемого электрода, мм	5450	5600	5300
Масса слитка, т	5,5	10,3	26,5
Длина слитка, мм	4000	4000	4000
Номинальный ток, кА	25,0	37,5	50,0

Окончание табл. 3.1

Характеристика	ДТВ-6, 5-Г6	ДТВ-8, 7-Г10, 6ДТВ10Г10	ДТВ-14-Г26
Напряжение, В	75	75	75
Мощность вспомогательного оборудования, кВт	35	35	70
Расходы охлаждающей воды, не более, м ³ /ч	70	80	120
Общая масса печи, т	118	120	200
Габариты в плане, мм:			
длина	7335	7335	9000
ширина	5410	5410	6000
Высота печи, мм:			
общая	20940	20940	21400
заглубление	7800	7800	7900
Максимальный ход, мм:			
штока электрододержателя	3000	3000	3320
кристаллизатора	3200	3200	2400
Высота вакуумной камеры, мм	2300	2300	2400

В печах типа ДТВ (рис. 3.5) после плавки от камеры печи 3 отсоединяется изложница 4 вместе со слитком, которая затем несколько опускается гидравлическим механизмом 5 и отводится в сторону. Мостовым краном слиток извлекается из изложницы и после контроля состояния изложницы в нее загружается расходный электрод. Для печей второго перепада два слитка первого перепада свариваются на специальной установке. Загруженная изложница по рельсам подкатывается под камеру печи и герметично к ней присоединяется. При одной и той же общей высоте печей типа ДСВ и ДТВ в печах типа ДТВ получают слитки, имеющие почти в 2 раза большую длину. Производительность печи возрастает примерно в 2 раза за счет сокращения числа непроизводительных операций — выдержки с целью охлаждения выплавленного слитка в печи, заключительного и длительного этапа плавки, направленного на выведение усадоч-

ной раковины. Печи типа ДТВ оснащены автоматизированными устройствами, позволяющими вести процесс плавки по заранее разработанной программе.

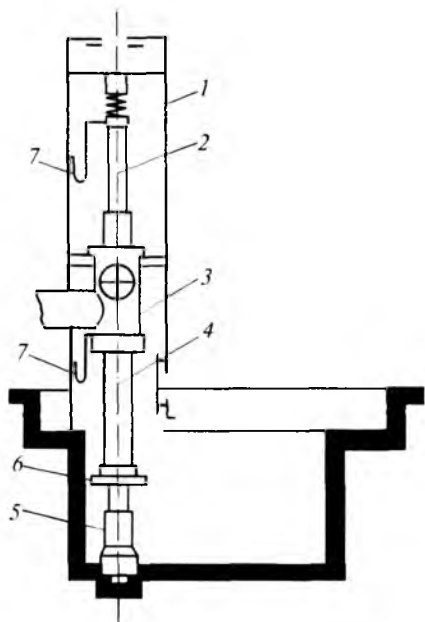


Рис. 3.5. Вакуумная электродуговая печь ДТВ-8:

1 – защитная камера; 2 – электрододержатель; 3 – вакуумная камера; 4 – изложница; 5 – гидравлический плунжер; 6 – поддон; 7 – токоподвод

Вакуумная электродуговая печь ВД-11 отличается от печей типов ДСВ и ДТВ значительно меньшей высотой, обеспечивая при этом получение одинаковых по длине слитков. Это достигается исключением из конструкции механизма перемещения поддона (печь типа ДСВ) и изложницы (печь типа ДТВ).

На рис. 3.6 представлена схема печи ВД-11. Как и в печах типа ДТВ, после окончания плавки изложница отсоединяется от камеры печи. Однако в данной конструкции изложница 1 неподвижна и находится в специальном приемке, а камера печи 6 вместе с электрододержателем 4 и механизмом его перемещения 3 поднимается с помощью гидроподъемника 5 над изложницей, поворачивается около опорной колонны 2 на 90° и опускается на специальную подставку. Изложница извлекается из приемки мостовым краном и направляется на выгрузку слитка и профилактический осмотр.

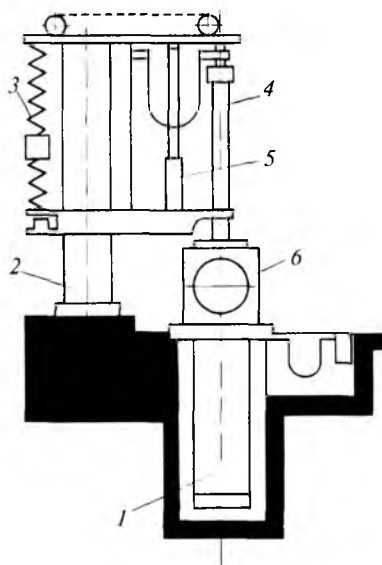


Рис. 3.6. Вакуумная электродуговая печь ВД-11:

1 – изложница; 2 – опорная колонна;
3 – механизм перемещения электродо-
держателя; 4 – электрододержатель;
5 – гидродъемник вакуумной каме-
ры; 6 – вакуумная камера

В это время в прямок-шахту устанавливают другую изложницу и новый расходный электрод. К изложнице подводится вакуумная камера, которая герметично с ней соединяется. После подсоединения вакуумной системы и создания необходимого разрежения начинают плавку в обычном для электродуговых печей порядке.

Печь ВД-11 рассчитана на установку изложниц высотой до 4550 мм для производства титановых слитков массой 2,0; 4,7; 6,8 и 13,7 т.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. При изготовлении слитков из большинства широко используемых в промышленности сплавов технологический процесс изготовления осуществляется по общей для них традиционной схеме. Почему при изготовлении слитков из титановых сплавов указанный выше технологический процесс не может быть осуществлен в полной мере?
2. Высокая химическая активность титана, находящегося в жидком состоянии, предъявляет ряд требований к технологическому процессу плавки и литья слитков. Назовите эти требования.
3. Какие типы плавильных печей и источники тепловой энергии используются для плавки титановых сплавов и изготовления слитков?

4. Опишите конструкцию типовой вакуумной электродуговой печи для плавки и литья титановых слитков. Назовите марки печей, используемых в промышленности, их конструктивные и технологические особенности.
5. Каким требованиям должна удовлетворять конструкция изложницы для изготовления титановых слитков?
6. Перечислите достоинства и недостатки вакуумных электродуговых печей с расходуемым электродом марок ДСВ-5, ДТВ, ВД-11.

ГЛАВА 4 ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛИТКОВ В ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ

4.1. Шихта и ее подготовка к плавке

Технологический процесс изготовления слитков в вакуумных электродуговых печах состоит из следующих основных этапов: подготовка шихты, изготовление расходного электрода для первого переплава, плавка расходного электрода, подготовка слитков ко второму переплаву, плавка расходного электрода (слиток первого переплава) и получение слитка второго переплава, механическая обработка и контроль слитка.

Расходуемый электрод для получения слитка первого переплава изготавливают из шихты, состоящей из титановой губки, легирующих элементов в виде чистых металлов или различных по химическому составу лигатур, а также производственных титановых отходов (куски, листовая обрезь, стружка).

Исходным сырьем для получения титана являются минералы: рутил (практически чистый диоксид титана TiO_2), ильменит $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$ и др. В результате ряда технологических операций из руды сначала получают тетрахлорид титана TiCl_4 , который восстанавливают магниетермическим методом в особых печах — реакторах. В процессе восстановления металлический титан выпадает в виде хлопьевидных дендритов, которые оседают на дно и стенки реактора. Полученная в результате восстановления губчатая масса (титановая губка) подвергается вакуумной сепарации с целью очистки ее от примесей (Mg , TiCl_4).

Поставки титановой губки осуществляются партиями массой от 500 до 5000 кг; ее хранят и транспортируют в алюминиевых бабарах, бидонах, контейнерах.

Титановая губка представляет собой серую пористую металлическую массу плотностью от 1500 до 2900 кг/м³. Она содержит

примеси — кислород, азот, водород, железо, кремний, углерод, хлор и др., которые оказывают существенное влияние на свойства титана и его сплавов. Так, с увеличением содержания кислорода, азота, углерода, железа резко снижаются пластические характеристики титановых сплавов и одновременно увеличиваются прочность и твердость. Водород — особо вредная примесь в титановых сплавах, приводящая к резкому снижению ударной вязкости сплава и его охрупчиванию (водородная хрупкость).

Количество примесей, содержащихся в губчатом титане, определяется технологией его получения. Основными источниками загрязнения титановой губки примесями являются тетрахлорид титана, магний и аргон, которые используют для получения титановой губки. Ряд элементов (железо, хром и др.) попадают в титан из материала реактора, в котором получают губчатый титан.

В табл. 4.1 приведены характеристики ряда марок титановой губки. Титановая губка маркируется по твердости НВ металла, полученного из губки. Чем выше значение твердости, тем больше содержание вредных примесей.

Таблица 4.1. Марки и химический состав титановой губки

Марка	Твердость металла, НВ	Химический состав, %, не более						
		N	C	Cl	Fe	Si	Ni	O ₂
ТГ-90	90	0,02	0,02	0,08	0,06	0,01	0,05	0,04
ТГ-100	100	0,02	0,03	0,08	0,07	0,02	0,05	0,04
ТГ-110	110	0,02	0,03	0,08	0,09	0,03	0,05	0,06
ТГ-120	120	0,03	0,04	0,10	0,13	0,04	0,05	0,08
ТГ-150	150	0,04	0,05	0,12	0,2	0,04	0,05	0,10

Для получения слитка заданного химического состава в шихту вводятся в зависимости от марки сплава легирующие элементы — алюминий, марганец, молибден, ванадий, цирконий, хром, олово, кремний, железо и др. Составы сплавов приведены в табл. 2.1. Физические свойства этих элементов и в первую очередь такие, как температура плавления, плотность, упругость пара, в большинстве случаев существенно отличаются от аналогичных свойств титана. Поэтому при введении легирующих элементов в шихту в чистом виде зачастую получают слитки с недопустимой химической неоднородностью. Например, в ряде промышленных сплавов в качестве леги-

рующего компонента содержится молибден (температура плавления 2620°C , плотность $10\,200\text{ кг/м}^3$). Если в шихту вместе с титановой губкой введены куски чистого молибдена, то при плавке он практически не растворяется в жидком титане. В процессе плавки торцевого расходного электрода нагревается до температуры плавления титана 1665°C и капли жидкого титана стекают в ванну (рис. 4.1). Кусок молибдена не расплавляется на торце расходного электрода и падает в ванну в виде твердого металла. Так как его плотность значительно выше, чем у жидкого титана, то кусок молибдена опускается на дно ванны. В нижней части ванны жидкий титан затвердевает и молибден, не успев раствориться в жидком титане, остается в виде включения в слитке. Второй переплав полученного слитка также не приводит к растворению молибдена. Поэтому молибден и ряд тугоплавких и других элементов вводят в шихту в виде лигатур, температура плавления и плотность которых не должны существенно отличаться от температуры плавления и плотности титана.

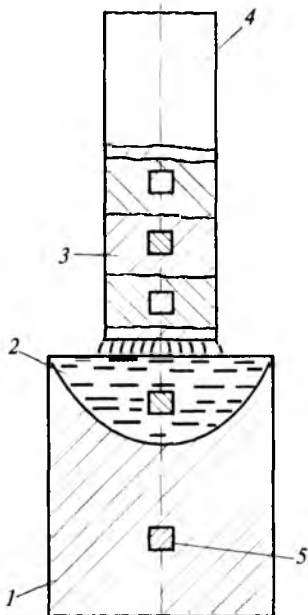


Рис. 4.1. Плавка расходного электрода, содержащего куски тугоплавкого элемента:
1 — слиток; 2 — ванна жидкого металла; 3 — порция шихты; 4 — расходный электрод; 5 — куски тугоплавкого элемента

Если температура плавления вводимого элемента или лигатуры близка к температуре плавления титана, то расплавление лигатуры

происходит на торце расходующего электрода и легирующий компонент будет равномерно распределяться по объему жидкой ванны.

Целесообразность введения элементов в виде лигатуры определяется их температурой плавления и плотностью.

В зависимости от близости температур плавления титана и вводимого в него элемента все легирующие элементы можно разделить на три группы:

- 1) элементы, имеющие температуру плавления значительно выше, чем титан, — вольфрам ($t_{пл} = 3380^\circ\text{C}$, плотность $19\,340\text{ кг/м}^3$), молибден ($t_{пл} = 2620^\circ\text{C}$, плотность $10\,200\text{ кг/м}^3$), ниобий ($t_{пл} = 2420^\circ\text{C}$, плотность 8570 кг/м^3), тантал ($t_{пл} = 3000^\circ\text{C}$, плотность $16\,600\text{ кг/м}^3$), ванадий ($t_{пл} = 1920^\circ\text{C}$, плотность 6100 кг/м^3). Плотность этих элементов значительно больше, чем у титана. Элементы этой группы вводят в шихту только в виде лигатур;
- 2) элементы, имеющие близкую к титану температуру плавления, — хром ($t_{пл} = 1820^\circ\text{C}$, плотность 7150 кг/м^3), цирконий ($t_{пл} = 1850^\circ\text{C}$, плотность 6500 кг/м^3), железо ($t_{пл} = 1539^\circ\text{C}$, плотность 7880 кг/м^3), кремний ($t_{пл} = 410^\circ\text{C}$, плотность 2300 кг/м^3), марганец ($t_{пл} = 1250^\circ\text{C}$, плотность 7410 кг/м^3). Элементы этой группы иногда вводят в шихту в виде технически чистых металлов. Для более полного растворения вводимых элементов в титане размеры кусков вводимых в шихту металлов не должны превышать 10 мм ;
- 3) элементы, имеющие температуру плавления значительно ниже температуры плавления титана, — алюминий ($t_{пл} = 659^\circ\text{C}$, плотность 2700 кг/м^3), олово ($t_{пл} = 232^\circ\text{C}$, плотность 7290 кг/м^3). Они также вводятся в сплав с помощью лигатур, так как в связи с низкой температурой плавления, склонны выплавляться из прессованного расходующего электрода до их выхода на торец электрода во время плавки, что приводит к обогащению алюминием и оловом данной части ванны с жидким металлом и химической неоднородности слитка по его длине.

В зависимости от химического состава сплава применяют либо двойные лигатуры (алюминий—молибден, алюминий—ванадий и др.), либо сложные по химическому составу комплексные лигатуры. В табл. 4.2 представлены химические составы и физические свойства (температура плавления, плотность) ряда промышленных лигатур, используемых для выплавки титановых сплавов. Эти лигатуры имеют температуру плавления и плотность, близкие к данным параметрам титана, что способствует получению однородных по химическому составу слитков.

Таблица 4.2. Химический состав и физические свойства лигатур

Лигатура	Содержание легирующих компонентов, %									Плотность, г/см ³	Температура плавления, °С
	Mo	Cr	V	Zr	Ti	Fe	Si	Al	W		
АХМК	30-34	23-27	-	-	-	3-6	2,5-4,0	Ост.	-	4,7	1430
АХМКФ	32-36	21-25	-	-	-	4-6	2,5-4,0	Ост.	Менее 4,0	5,2	1470
АМТ	48-52	-	-	-	6-9	-	-	Ост.	-	5,0	1480
АМТФ	48-52	-	-	-	6-9	-	-	-	Менее 4,5	5,1	1580
АХМ-50	38-42	50-53	-	-	-	-	-	6-9	-	7,1	1800
АШМК	38-42	-	-	18-21	-	-	2,5-3,5	Ост.	-	4,8	1590
АШМКФ	38-42	-	-	18-21	-	-	2,5-3,5	-	Менее 4,0	4,9	1610
АМВТ	35-38	-	30-34	-	Ост.	-	-	Менее 16,5	-	5,8	1830
К5	32-34	6-8	32-34	-	-	5-8	-	Ост.	-	5,8	1720
К5к	32-34	6-8	32-34	-	-	5-8	-	-	Менее 3,5	5,9	1750
ВнАЛ	-	-	70-80	-	-	-	-	-	-	4,9	1620
ЛТ7	-	-	-	-	Ост.	10-13	4-6	6-8	-	4,8	1560

Перед использованием чистые металлы и легатуры размельчают на куски размером не более 10–15 мм; частицы размером менее 2 мм отсевают.

Оборотные отходы — титановые куски, листовую обреш, стружку — после соответствующей подготовки вводят в количестве 25–30 % в шихту для прессования электрода. Отходы, предназначенные для переплавки, предварительно очищают, кусковые отходы галтуют для удаления оксидов с поверхности. Чтобы удалить газонасыщенный поверхностный слой, отходы подвергают химическому травлению. Стружку измельчают на дробилке и с целью очистки от посторонних включений пропускают через магнитный сепаратор.

4.2. Изготовление и плавка расходного электрода

Изготовление расходных электродов для первого перепада путем полунепрерывного прессования на горизонтальных или вертикальных гидравлических прессах исходных шихтовых материалов через конусную или цилиндрическую проходную матрицу — наиболее распространенный способ.

На рис. 4.2 представлена схема прессования электрода в конусную (рис. 4.2, а) и цилиндрическую (рис. 4.2, б) матрицу. Мерная порция шихты, представляющая собой сыпучую смесь материалов — губчатого титана, кусков легирующих компонентов, легатур и оборотных отходов, из шихтопровода 5 попадает в приемный патрубок 1. При движении пресс-штемпеля 4 порция шихты направляется в матрицу 10 и уплотняется под действием высокого давления. Затем пресс-штемпель отводят в исходное положение и из шихтопровода на приемный патрубок поступает новая порция шихты, которая также уплотняется. Процесс прессования повторяется до тех пор, пока не будет получен электрод 12 необходимой длины.

Электроды малого диаметра (менее 200 мм) изготавливают на вертикальных или горизонтальных гидравлических прессах усилием до 20 МН. На горизонтальных прессах усилием до 35 МН можно получать расходные электроды диаметром до 350 мм.

Для изготовления расходных электродов больших диаметров применяют специализированные вертикальные гидравлические прессы усилием 100 МН. Длина прессованных расходных электродов может достигать 5000 мм.

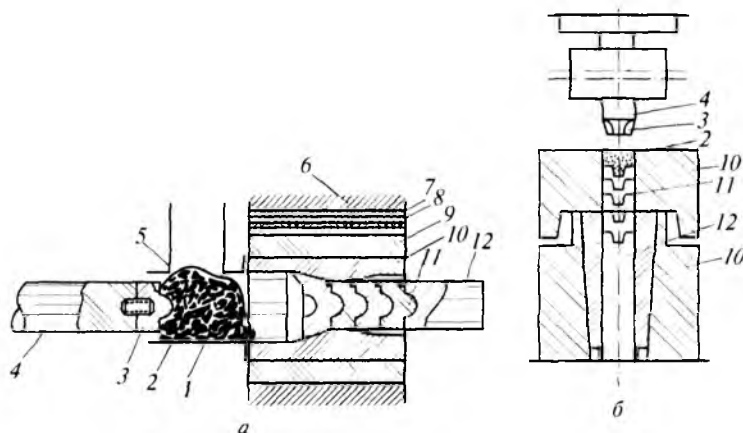


Рис. 4.2. Прессование расходного электрода в конусную (а) и цилиндрическую (б) матрицы:

1 — приемный патрубок; 2 — кусковая шихта перед прессованием; 3 — пресс-шайба; 4 — пресс-штыбель; 5 — шихтопровод; 6 — контейнер; 7 — изоляция; 8 — электрообогреватель; 9 — втулка; 10 — матрица; 11 — спрессованная порция шихты; 12 — электрод

Плавка расходного электрода осуществляется после изготовления расходного электрода. Для получения слитка первого перепада расходный электрод устанавливают в электродугую плавильную печь. Процесс проводят в следующем порядке: 1) перед началом плавки, например в печах типа ДСВ-5, поддон опускают в крайнее нижнее положение и устанавливают на него расходный электрод; 2) поднимают поддон с установленным электродом и герметично соединяют с нижним фланцем изложницы; 3) откачивают воздух, проверяют натекание и давление в печи и при соответствии их нормам подают напряжение от источника питания; 4) опускают вниз электрододержатель с огарком, в момент соприкосновения огарка с верхним концом электрода происходит короткое замыкание; 5) несколько приподнимают электрододержатель, и между расходным электродом и огарком зажигается электрическая дуга. Дуга разогревается и подплавляет

металл на огарке и расходуемом электроде; б) опускают электрододержатель вниз до соприкосновения огарка с электродом и отключают напряжение. Так происходит приварка расходуемого электрода к электрододержателю; 7) поднимают приваренный электрод вместе с электрододержателем и вновь подают напряжение, в результате чего между поддоном и электродом зажигается электрическая дуга; 8) начинают плавку при пониженной мощности во избежание прожога поддона, предварительно уложив на поддон некоторое количество титана в виде компактных кусков, титановой губки или стружки; 9) повышают ток до номинального после появления жидкого металла; по окончании плавки слиток оставляют в печи для охлаждения до 400–500 °С.

4.3. Получение слитка второго переплава

Выгруженный из печи слиток первого переплава готовят ко второму переплаву: 1) направляют горячие слитки в мощную установку, где металлическими щетками в проточной воде с поверхности слитков удаляются слои хлоридов; 2) обрезают «короны» слитков на токарном станке и обтачивают по образующей окисленные места слитка.

Второй переплав проводят, как говорилось выше, в основном для устранения химической неоднородности слитка первого переплава. В целом параметры и режим плавки такие же, как в первом переплаве, но в конце плавки ток и напряжение снижают, чтобы предотвратить образование глубокой усадочной раковины в слитке.

При производстве крупных слитков (8–10 т) используют расходуемый электрод, составленный из двух-трех слитков первого переплава, которые сваривают по литниковым торцевым поверхностям на специальной установке аргоно-дуговым методом. После установки расходуемого электрода в печь, ее герметизации и вакуумирования электрод приваривают через переходник к электрододержателю.

Полученный слиток после повторной переплавки обтачивают на специальных токарных слиткообдирочных и токарно-винторезных станках. Так как поверхностные слои слитка имеют ряд де-

фектов — неслитоны, наплывы, раковины, окисленные поверхности и др., обдирка производится на глубину 5–20 мм. Масса слитка при этом уменьшается на 7–12 %.

После механической обработки слитки направляются на контроль качества, который включает определение химического состава сплава, замер твердости на поверхности слитка, ультразвуковой контроль слитка с целью выявления внутренних дефектов и испытание образцов для определения механических свойств.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные этапы технологического процесса изготовления слитков в вакуумных электродуговых печах.
2. С целью получения титанового слитка надлежащего качества сначала получают слиток первого переплава, а затем его переплавляют и получают слиток второго переплава. Дайте объяснение этому факту.
3. Назовите состав шихты, используемой для изготовления расходного электрода первого переплава.
4. Легирующие элементы, вводимые в состав титановых сплавов, существенно отличаются от титана по температуре плавления и плотности. В каком виде и почему подобные компоненты вводятся в состав шихты?
5. Составьте схему устройства для изготовления расходного электрода с целью получения слитка первого переплава.
6. Расходуемый электрод для получения слитков второго переплава собирают из слитков первого переплава. Укажите порядок сборки расходного электрода для второго переплава.

ГЛАВА 5 ХИМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ СЛИТКОВ

5.1. Виды химической неоднородности

Особенности технологического процесса получения слитков из титановых сплавов в вакуумных электродуговых печах — *порционное прессование расходуемого электрода*, ограниченный объем ванны с жидким металлом, кратковременное его пребывание в жидком состоянии — обуславливают такую проблему технологического процесса изготовления слитков, как получение слитка однородного химического состава с одинаковыми механическими свойствами металла по объему слитка.

Например, при выплавке слитка из сплава, содержащего олово, в каждую порцию шихты при изготовлении расходуемого электрода вводится постоянное количество олова. В процессе плавки электрод нагревается, олово преждевременно выплавляется из электрода и химический состав слитка по этой причине будет недопустимо неоднородным.

К неоднородности слитка по химическому составу, обусловленной ограниченным объемом ванны с жидким металлом и кратковременным пребыванием металла в жидком состоянии при вакуумной электродуговой плавке, может привести сочетание таких свойств легирующего элемента (или лигатуры), как высокие температура плавления и плотность. В процессе плавки металл торцевой части расходуемого электрода во время горения дуги достигает температуры, которая незначительно (на 200–300 °С) превышает температуру плавления титанового сплава, и капли жидкого металла через зону электрической дуги переносятся в ванну выплавляемого слитка. Это обстоятельство затрудняет расплавление и растворение в сплаве кусочков легирующих компонентов и лигатур, температура плавления которых выше, чем температура плавления титанового сплава. Особенно неблагоприятные условия при этом создаются для легирующих элементов, имеющих более высокую плотность,

чем титан. В этих условиях плавки легирующие компоненты, попадающие из расходного электрода в ванну с жидким металлом, не успевают полностью расплавиться, вследствие чего слиток оказывается неоднородным по химическому составу и включает кусочки нерасплавившихся легирующих компонентов.

Еще одна из важнейших особенностей производства слитков из титановых сплавов — плавка в вакууме при непосредственной близости жидкого металла и электрической дуги с водоохлаждаемой стенкой кристаллизатора. Высокая температура и низкое давление в зоне плавки способствуют испарению летучих легирующих компонентов и примесей. Из зоны плавления газообразные продукты удаляются по зазору между расходным электродом и холодными стенками кристаллизатора (см. рис. 3.2). Значительная часть паров конденсируется на стенках кристаллизатора, и по мере приближения зоны плавки эти вещества вновь растворяются в металле, в результате чего центральная часть выплавленного слитка оказывается обедненной летучим легирующим компонентом, а его периферийные зоны содержат этого элемента значительно больше расчетного. Кроме того, в поверхностном слое слитка концентрация примесей также оказывается повышенной.

Помимо изложенного выше следует учитывать особенности кристаллизации металла в условиях вакуумной электродуговой плавки: скорость затвердевания металла при литье слитков относительно невелика, а жидкий металл, находящийся в ванне, интенсивно перемешивается электромагнитным полем, создаваемым соленоидом, которым оборудованы все плавильные установки. Поэтому в сплавах с широким температурным интервалом кристаллизации в период их затвердевания могут получить развитие ликвационные процессы, которые также приводят к химической неоднородности слитка.

На основе анализа особенностей процесса вакуумной электродуговой плавки можно выделить следующие виды неоднородности химического состава слитка:

связанную с ограниченным объемом жидкой ванны и неоднородностью состава металла, поступающего в ванну жидкого металла. В этом случае в слитках образуется периодическая неоднородность металла как по длине слитка, так и в поперечном направлении; появляющуюся в результате изменения концентрации легирующих компонентов в жидкой ванне за счет их испарения с поверх-

ности жидкого металла и конденсации на холодных стенках кристаллизатора;

- ◇ связанную с ливкационными процессами, развивающимися в период затвердевания металла.

5.2. Периодическая неоднородность

Титановую губку перед прессованием для получения расходуемого электрода делят на порции определенной массы и в каждую порцию вводят дозированное количество легирующих компонентов в виде кусочков металла и затем последовательно подают в контейнер пресса (см. рис. 4.2). Слиток, полученный после переплавки расходуемого электрода, оказывается неоднородным по химическому составу по следующей причине. При плавке расходуемого электрода в определенный момент времени в ванну с жидким металлом попадает кусок легирующего компонента. Если он быстро расплавляется и равномерно распределяется по объему жидкого металла, то в этот момент его концентрация в металле будет максимальной. В зависимости от скорости плавки слой определенной толщины жидкого металла, находящийся в нижней части ванны, затвердевает и концентрация легирующего компонента в затвердевшем слое будет максимальной. При дальнейшем плавлении расходуемого электрода в ванну будет попадать только титан и концентрация легирующего компонента в жидком металле ванны будет снижаться до тех пор, пока в ванну вновь не попадет кусок легирующего компонента из следующей порции шихты. Так в выплавляемом слитке возникает периодическая химическая неоднородность.

В работах [5, 19] впервые была аналитически решена задача распределения легирующих компонентов в слитке, полученных методом вакуумной электродуговой плавки прессованного расходуемого электрода. Задача решалась при допущениях, что в процессе плавки химический состав жидкого металла одинаков во всем объеме ванны, а распределение попадающих в ванну капель жидкого металла или кусочков легирующих компонентов происходит достаточно быстро. Элементы, удовлетворяющие этому допущению, называют нормально распределяющимися. Такими

элементами являются те, которые имеют близкую к титану плотность и температуру плавления.

Рассмотрим, как изменяется концентрация легирующего компонента при его однократном введении в порцию шихты, используемой для изготовления расходуемого электрода.

Пусть в порции шихты расходуемого электрода имеется легирующий компонент А, который, попав в ванну с жидким металлом, создает его концентрацию C_0 . Считаем, что элемент А моментально расплавляется и растворяется и равномерно распределяется по объему жидкой ванны. Поэтому в момент попадания в ванну элемента А его концентрация C_0 наибольшая. При дальнейшем плавлении расходуемого электрода концентрация элемента А в ванне будет уменьшаться до тех пор, пока элемент А из следующей порции шихты вновь не окажется в ванне с жидким металлом.

Примем, что в момент τ после попадания элемента А в ванну его концентрация составит C . Тогда общая масса легирующего компонента А в ванне m_A в момент τ будет равна: $m_A = Cm_B$, где m_B — масса ванны с жидким металлом.

Через отрезок времени dt металл массой vdt (v — скорость кристаллизации металла, кг/с) закристаллизуется и элемент А в количестве $Cvdt$ перейдет в твердое состояние, а в ванне останется компонент А в количестве $Cm_B - Cvdt$. Следовательно, концентрация элемента А в жидкой ванне в момент $\tau + dt$ будет равна

$$C + dC = \frac{Cm_B - Cvdt}{m_B}$$

или

$$dC = -Cvdt / m_B, \quad (5.1)$$

где dC — изменение концентрации элемента А за время dt . Отношение $v/m_B = K$, называемое коэффициентом разбавления, характеризует степень изменения концентрации элемента А в ванне.

Интегрирование (5.1) дает зависимость, показывающую распределение легирующего компонента А после его попадания в ванну из расходуемого электрода:

$$C = C_0 e^{-k\tau_A}, \quad (5.2)$$

где τ_A — время, отсчитываемое от момента введения в ванну одной порции легирующего компонента до момента введения другой.

Взаимосвязь между скоростью литья v , кг/с, диаметром слитка d и высотой ванны H , м, описывается уравнением

$$H = 5 (1 - 0,25d)v. \quad (5.3)$$

Используя уравнение распределения (5.2) и формулу профиля ванны (5.3), можно определить среднюю концентрацию легирующего компонента в любом рассматриваемом сечении слитка.

Примем, что в момент τ_0 в ванну с жидким металлом вводится из расходоуемого электрода элемент А. Компонент введен в ванну на уровне сечения $b-b$ (рис. 5.1, а). Концентрация компонента А в ванне жидкого металла в данный момент времени будет максимальной и примем ее равной C_0 . При дальнейшем наплавлении металла концентрация элемента А в ванне будет уменьшаться в соответствии с законом распределения (5.2). Снижение концентрации будет происходить до момента введения в ванну следующей порции компонента А. Примем, что следующая порция компонента А будет введена после затвердевания металла в сечении $b-b$ (см. рис. 5.1, б).

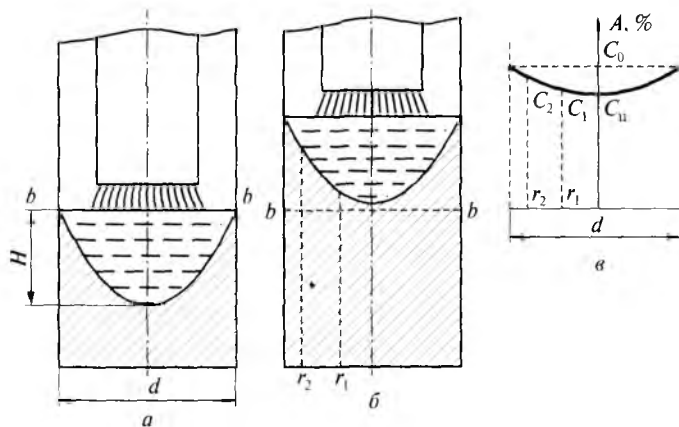


Рис. 5.1. Схема к выводу уравнения, определяющего среднюю концентрацию легирующего компонента по сечению слитка

Таким образом, рассматривая сечение $b-b$ затвердевшего металла слитка можно установить, что на внешней поверхности слитка в сечении $b-b$ концентрация компонента А будет равна C_0 ($\tau = 0$). На расстоянии от центра слитка r_1 концентрация компонента А составляет $C_1 = C_0 e^{-k\tau_1}$, а на расстоянии $r_2 - C_2 = C_0 e^{-k\tau_2}$ и т.д., где

τ_1, τ_2 — время, прошедшее после введения компонента А в ванну с жидким металлом. В центре сечения $b-b$ слитка концентрация компонента А будет равна $C_{ц} = C_0 e^{-k\tau_A}$, где τ_A — время затвердевания металла в сечении $b-b$ (рис. 5.1, в).

Зная массу ванны жидкого металла m_B и скорость литья v , определяем время затвердевания τ_A жидкого металла в сечении $b-b$:

$$\tau_A = \frac{m_B}{v} = \frac{H\pi r^2 \rho}{2v},$$

где ρ — плотность жидкого металла, кг/м³; r — радиус слитка, м.

Концентрация компонента А в центре слитка $C_{ц}$ изменяется в зависимости от времени τ , прошедшего после введения компонента А в ванну с жидким металлом:

$$C_{ц} = \frac{C_0 + C_0 e^{-k\tau}}{2} = \frac{C_0}{2} (1 + e^{-k\tau}).$$

Определим среднюю по сечению $b-b$ слитка концентрацию компонента А:

$$C_{ср} = \frac{C_0 + C_0 e^{-k\tau_A}}{2} = \frac{C_0}{2} (1 + e^{-k\tau_A}).$$

Средняя максимальная концентрация $C_{ср}^{\max}$ компонента А по сечению слитка всегда достигается на открытой поверхности слитка $b-b$ в момент введения порции (навески) легирующего компонента, а средняя минимальная концентрация $C_{ср}^{\min}$ компонента А — на сечении, находящемся между двумя соседними плоскостями ввода легирующего компонента.

Характеристикой степени неоднородности слитка может служить величина δ :

$$\delta = \frac{C_{ср}^{\max} - C_{ср}^{\min}}{2C_{расч}} 100 \%,$$

где $C_{расч}$ — средняя расчетная концентрация легирующего компонента.

Ясно, что слитки, выполненные путем переплава расходуемого электрода, полученного порционным прессованием, всегда не-

однородны по химическому составу. Поэтому слитки первого перепада перепаляют в слитки второго перепада.

Химическая неоднородность слитка первого перепада может быть снижена за счет соответствующей подготовки шихты к прессованию электрода. Для этого следует использовать шихтовые материалы одинакового фракционного состава. Перед прессованием необходимо тщательно перемешать шихту, а легирующие элементы вводить в шихту в виде лигатур, имеющих температуру плавления, близкую к температуре плавления титана.

Однородность слитка по химическому составу после второго перепада зависит также от соотношения массы одной порции шихты, направляемой на изготовление электрода, и массы ванны жидкого металла. Установлено [1, 19], что слиток второго перепада будет однородным по химическому составу в том случае, если соотношение массы порции шихты, используемой для изготовления расходного электрода первого перепада $m_{\text{ш}}$, и массы ванны жидкого металла $m_{\text{в}}$ составляет

$$m_{\text{ш}}/m_{\text{в}} \leq 0,5.$$

Масса ванны жидкого металла зависит от радиуса слитка

$$m_{\text{в}} = \frac{\pi \rho}{2} r^2 H,$$

где ρ — плотность металла, кг/м³; r — радиус слитка, м; H — высота ванны, м.

Тогда условие однородности сплава по химическому составу слитка при двойном перепаде может быть записано в виде

$$m_{\text{ш}} \leq 0,5 m_{\text{в}} \leq 0,25 \pi \rho r^2 H,$$

где $m_{\text{ш}}$ — масса порции шихты, идущей на изготовление расходного электрода для первого перепада; r — радиус слитка второго перепада, м.

5.3. Неоднородность слитков, вызываемая испарением легирующих компонентов

Легирующие элементы, имеющие высокое давление паров, в процессе плавки частично испаряются. Пары металлов и ряда других летучих элементов при своем движении от зонь

плавки к верхнему торцу изложницы охлаждаются и конденсируются на ее стенках. С перемещением зоны плавки вверх жидкий металл вступает в контакт с конденсатом. Конденсированные вещества частично растворяются в поверхностных слоях слитка, а оставшаяся часть вновь испаряется. В результате содержание легирующего компонента в центральной части слитка оказывается пониженным, а в периферийных слоях — повышенным.

Скорость испарения летучего компонента в вакууме может быть определена по уравнению

$$\omega = \frac{\sigma}{2j} (C_{\text{л}} - jP), \quad (5.4)$$

где ω — скорость испарения летучего компонента с единицы площади поверхности испарения; j — постоянная величина, определяемая на основе закона Рауля:

$$j = \left[\frac{M}{M_{\text{л}}} - C_{\text{л}} \left(\frac{M_{\text{л}}}{M} - 1 \right) \right] \frac{1}{P_{\text{л}}^0};$$

$C_{\text{л}}$ — текущая концентрация летучего компонента в слитке, массовые доли; P — давление остаточных или инертных газов, Н/м²; M , $M_{\text{л}}$ — атомные массы основного металла и летучего компонента; $\sigma = 5,833 \cdot 10^{-2} \sqrt{M_{\text{л}}/T}$; T — температура металла на поверхности испарения, К.

Так как $C_{\text{л}}(M_{\text{л}}/M - 1)$ — малая величина, то ею можно пренебречь; тогда

$$j = \frac{M}{M_{\text{л}} P_{\text{л}}^0}, \quad (5.5)$$

где $P_{\text{л}}^0$ — давление насыщенного пара рассматриваемого компонента в чистом состоянии, Н/м²; $P_{\text{л}}$ — упругость пара компонента в сплаве, Н/м².

Подставляя (5.5) в (5.4), после несложных преобразований получаем:

$$\omega = \frac{\sigma}{2} (P_{\text{л}} - P),$$

т.е. скорость испарения пропорциональна разности упругости пара компонента в сплаве и давления остаточных или специально введенных инертных газов.

По (5.4) найдем закономерности изменения химического состава жидкого металла в процессе плавки и соответственно изменение концентрации компонента в центральной части слитка (без учета внешней корки, брызг и конденсатов летучих компонентов) (рис. 5.2).

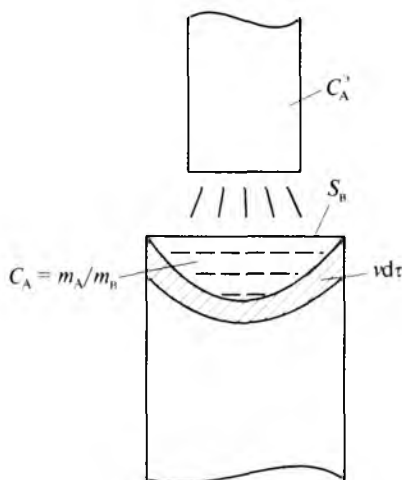


Рис. 5.2. Схема к выводу уравнения, описывающего изменение химического состава сплава в результате испарения «летучего» легирующего компонента

После поступления в ванну с жидким металлом легирующего компонента А его концентрация составит:

$$C_A = m_A / m_B.$$

За время dt часть металла затвердевает и, следовательно, доля компонента А переходит в твердую фазу в количестве

$$v C_A dt = v \frac{m_A}{m_B} dt.$$

За время dt летучий компонент А испарится с поверхности жидкой ванны слитка в количестве

$$\omega S_B dt,$$

где S_B — площадь поверхности ванны жидкого металла.

За это же время из электрода в ванну (лунку) поступит новая порция металла в количестве $v dt$, а вместе с ней в ванну будет введен элемент А в количестве

$$v d\tau C_A^0,$$

где $C_A^0 = m_A / m_{\text{э}}$ — концентрация компонента А в расходуемом электроде; $m_{\text{э}}$ — масса электрода.

Найдем изменение концентрации рассматриваемого элемента в жидкой ванне за $d\tau$:

$$dA = v d\tau C_A^0 - \omega d\tau S_B - v \frac{m_A}{m_B} d\tau$$

или, используя (5.4), запишем:

$$dA = C_A^0 v d\tau - S_B \frac{\theta}{2j} \left(\frac{m_A}{m_B} - jP \right) d\tau - v \frac{m_A}{m_B} d\tau. \quad (5.6)$$

Проинтегрировав по (5.6) m_A от $m_B C_0$ до $m_B C_A$ и τ от $\tau = 0$ до τ и упростив, получим:

$$C_A = \frac{S_B \frac{\theta}{2} P + v C_A^0}{S_B \frac{\theta}{2j} + v}, \quad (5.7)$$

откуда следует, что на перераспределение компонентов в результате испарения оказывают влияние: скорость плавки, давление остаточных газов в печи, температура металла, площадь поверхности жидкой ванны, давление насыщенного пара компонента в сплаве.

Анализ уравнения (5.7) позволяет сделать ряд практических выводов:

- количество испаряющегося металла в процессе плавки уменьшается с ростом скорости плавки, что способствует снижению химической неоднородности слитка по его сечению;
- скорость литья v связана с диаметром отливаемого слитка d соотношением $v = K \frac{1}{d^2}$. Поэтому с ростом диаметра изготавливаемого слитка концентрация «летучего» компонента в металле слитка будет уменьшаться;
- с повышением температуры на поверхности жидкой ванны количество испаряющегося «летучего» компонента возрастает. В этом

случае желательно увеличивать остаточное давление инертного газа в плавильно-заливочной установке;

- ◇ при неизменном режиме плавки неоднородность слитка по его длине не наблюдается. Из элементов, используемых в качестве легирующих компонентов, только марганец имеет довольно высокое давление паров.

Из рис. 5.3, где представлены результаты химического анализа титановых слитков диаметром 150 мм (кривая 1) и 250 мм (кривая 2) на содержание марганца, который вводился в расходующий электрод в количестве 8 %, следует, что в результате испарения марганца наблюдается значительное его перераспределение по сечению слитка. Причем с увеличением диаметра слитка степень перераспределения марганца существенно возрастает из-за большей площади поверхности жидкого металла и меньшей скорости плавки, что приводит к увеличению времени пребывания металла в жидком состоянии в поверхностном слое ванны. Для уменьшения испарения марганца плавку титановых сплавов, содержащих марганец, желательно проводить в атмосфере инертных газов.

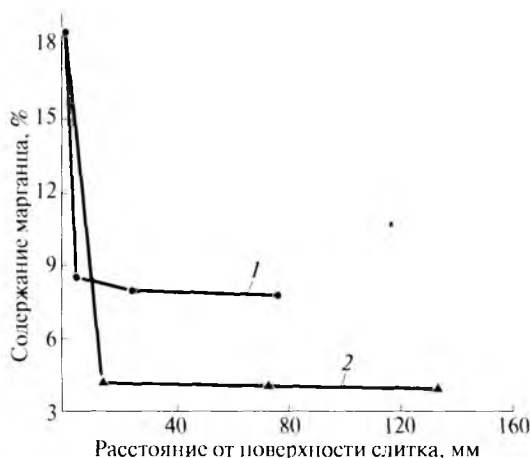


Рис. 5.3. Изменение химического состава по диаметру слитка

Такие элементы, как Al, Cr и Cu, испаряются в небольших количествах и существенно не обогащают периферийные слои слитка. Элементы с низким давлением паров (Mo, C, Fe и др.) в процессе плавки титановых сплавов не испаряются и не вызывают изменения химического состава титановых слитков.

5.4. Неоднородность слитков, вызываемая зональной ликвацией

В слитках из титановых сплавов так же, как и в слитках из алюминиевых и других сплавов, наблюдается зональная ликвация, которая выражается в том, что по горизонтальному сечению слитка возникает неоднородность химического состава. Степень развития зональной ликвации зависит от характера затвердевания металла и свойств сплава. Общие закономерности развития зональной ликвации в слитках из титановых сплавов такие же, как и в слитках из алюминиевых, магниевых и других сплавов.

В [1, 19] приведены результаты исследований, объясняющих механизм образования зональной ликвации в слитках из титановых и других сплавов, а также устанавливающих влияние состава сплава и ряда технологических параметров на образование и степень развития зональной ликвации в слитках.

Зональную ликвацию подразделяют на два вида — прямую и обратную (рис. 5.4). При прямой зональной ликвации центральная часть слитка обогащается компонентом, который понижает температуру сплава (рис. 5.4, б, кривая 1). Если легирующий компонент обогащает периферийные слои слитка, то это — обратная зональная ликвация (рис. 5.4, б, кривая 2).

К зональной, как и к другим видам ликваций (внутрикристаллической и внутридендритной, ликвации по удельным весам и др.), склонны сплавы, которые кристаллизуются в интервале температур и образуют при кристаллизации твердую и жидкую фазы различного химического состава. С увеличением температурного интервала кристаллизации и разницы в химических составах твердой и жидкой фаз склонность сплавов к зональной ликвации возрастает. Разница в составах твердой и жидкой фаз определяется коэффициентом распределения $K = C_T/C_{ж}$, где C_T и $C_{ж}$ — химические составы твердой и жидкой фаз в период затвердевания сплава. Если легирующий компонент понижает температуру плавления сплава, то $K < 1$, если при легировании температура ликвидуса возрастает, то $K > 1$.

Образование и степень развития зональной ликвации зависит не только от склонности сплава к ликвации, но и от таких факторов, как тепловые условия охлаждения металла слитка в период

его затвердевания; теплофизические свойства сплава; интенсивность циркуляции жидкого металла в период формирования слитка, вызываемой естественной или вынужденной конвекцией.

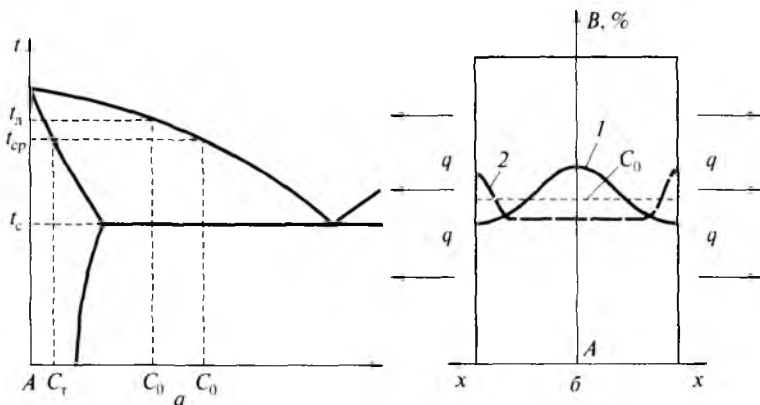


Рис. 5.4. Диаграмма состояния (а) и распределение компонента В по сечению слитка из сплава C_0 (б):

1 — зональная ликвация; 2 — обратная; q — тепловой поток; t_l — температура ликвидуса; t_{cr} — средняя температура при определении $K = C_T/C_{ж}$ в начальный момент затвердевания; t_c — температура солидуса (завершение затвердевания)

При анализе механизма формирования зональной ликвации необходимо учитывать ряд особенностей тепловых условий процесса затвердевания слитков из титановых сплавов. Из-за большой разницы температур затвердевающего металла и кристаллизатора (изложницы) тепловой поток в затвердевающем металле слитка оказывается довольно значительным. В связи с тем, что титановые сплавы имеют очень низкий коэффициент теплопроводности (см. табл. В1), в период затвердевания в металле возникает значительный градиент температур в горизонтальном сечении слитка.

При подобных тепловых условиях охлаждения затвердевание металла начинается в периферийных слоях слитка с образованием двухфазной зоны, состоящей из кристаллов и жидкого металла и называемой зоной объемного затвердевания металла. На рис. 5.5, а представлено распределение температуры по сечению слитка, охлаждающегося в подобных тепловых условиях, в начальный период затвердевания. Как видим, по сечению слитка возникает значительный температурный перепад δt между центром и поверхностью слитка.

Проанализируем кинетику затвердевания металла и механизм формирования зональной ликвации в слитке из сплава химического состава C_0 (см. рис. 5.4). В начальный период затвердевания температура металла в поверхностном слое слитка S ниже температуры ликвидус и выше температуры солидус. В рассматриваемый момент времени металл в зоне S находится в двухфазном состоянии. Пусть средняя температура металла в слое S равна t_{cp} . Тогда образовавшиеся в процессе затвердевания кристаллы будут иметь химический состав C_r , а жидкий металл — $C_{ж}$ (см. рис. 5.4). При дальнейшем понижении температуры зона объемного затвердевания S перемещается к центру слитка, а в периферийном слое слитка образуется слой полностью затвердевшего металла. Подобным образом развивается процесс затвердевания слитка при последующем понижении температуры вплоть до затвердевания последних порций жидкого металла в его центре. Этот механизм затвердевания называют объемно-последовательным, так как он начинается в определенной по ширине зоне S , которая последовательно перемещается от периферии слитка к его центру. Размеры зоны объемного затвердевания S зависят от температурного интервала кристаллизации сплава и температурного перепада по сечению слитка в период затвердевания сплава. С увеличением интервала кристаллизации сплава и снижением интенсивности охлаждения (δt уменьшается) размер зоны объемного затвердевания S возрастает.

На рис. 5.5 представлена схема формирования зональной ликвации в слитках из титановых сплавов.

На термической части рисунка (рис. 5.5, а) показано распределение температуры в поверхностном слое слитка в один из начальных моментов затвердевания металла в периферийной зоне слитка. В этот момент времени в слое слитка S температура металла ниже температуры ликвидуса и выше температуры солидуса сплава C_0 . Средняя температура сплава в слое металла S в рассматриваемый момент времени равна t_{cp} .

При подобном распределении температуры в слое слитка S в рассматриваемый момент времени металл находится в двухфазном состоянии — смесь кристаллов и жидкого металла. Соотношение масс твердой и жидкой фаз в пределах зоны S определяется температурой сплава. Зона объемного затвердевания S состоит из

двух частей — зоны твердо-жидкого металла $S_{\text{ТВ-Ж}}$ (доля твердой фазы более 50–60 %) и зоны жидко-твердого металла $S_{\text{Ж-Т}}$, где относительное количество твердой фазы изменяется примерно от 50 до 0 % в направлении от поверхности к центру слитка (направление x на рис. 5.5).

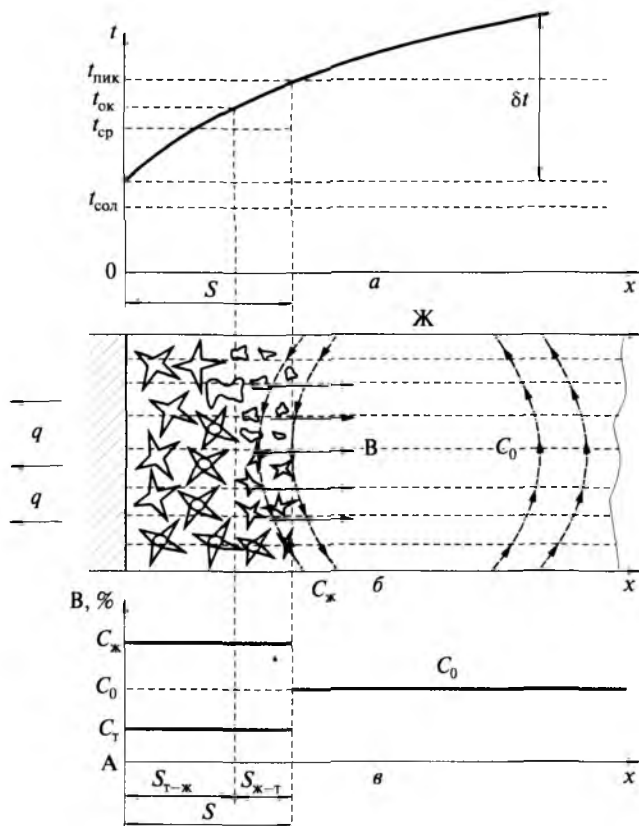


Рис. 5.5. Графическая иллюстрация процесса формирования прямой зональной ликвации в литых заготовках (сплав C_0 на рис. 5.4):

a — распределение температуры по сечению слитка в начальный период затвердевания; b — схема затвердевания сплава в поверхностном слое слитка; θ — химический состав металла по сечению слитка в начальный период затвердевания

При затвердевании сплава C_0 средние химические составы образовавшихся кристаллов $C_{\text{т}}$ и жидкой фазы $C_{\text{ж}}$ в слое слитка S_1 оказываются различными (рис. 5.5, θ). Жидкий металл обогащен

компонентом В по сравнению с его содержанием в исходном сплаве состава C_0 , а в образовавшихся кристаллах состава C_T концентрация компонента В ниже, чем в сплаве C_0 .

Таким образом, в результате кристаллизации металла в зоне S слитка образовался слой жидкого металла с повышенным содержанием легирующего компонента В. За пределами зоны S концентрация компонента В в жидком металле ниже, чем в жидком металле, находящемся в зоне S : $C_0 < C_{\text{ж}}$ (рис. 5.5, *в*). За счет разницы концентраций компонента В в двух соприкасающихся жидкостях возникает диффузионный поток компонента В, который увеличивает его концентрацию в жидком металле, находящемся в непосредственном контакте с двухфазной зоной S . Процесс диффузии компонента В из зоны S слитка условно показан стрелками на рис. 5.5, *б*.

По мере понижения температуры металла зона объемного затвердевания S перемещается в направлении x и описанный процесс кристаллизации и диффузия компонента В сопровождаются увеличением его концентрации в жидком металле, находящемся за пределами зоны объемного затвердевания, т.е. в центральной зоне слитка.

В подобных тепловых условиях формирования слитка возникает большая разница температур жидкого металла в центре слитка и на его периферии (см. рис. 5.5, *а*), в результате чего возникает интенсивная циркуляция жидкого металла, вызванная естественной конвекцией.

В большинстве печей на изложницах установлены катушки соленоида, которые создают переменное магнитное поле, интенсивно перемешивающее металл в ванне с жидким расплавом. В этом случае значительно усиливается интенсивность циркуляции жидкого металла по сравнению с естественной конвекцией. (Направление движения жидкого металла при естественной конвекции показано стрелками на рис. 5.5, *б*.)

Возникшая циркуляция жидкого металла приводит к перемещению жидкого металла с повышенным содержанием компонента В от зоны затвердевания металла S в центральную часть слитка. В результате циркуляции жидкого металла вместо перемещаемого из зоны $S_{\text{ж-т}}$ жидкого металла с повышенным содержанием компонента В (состав сплава $C_{\text{ж}}$) из центральной зоны слитка будет поступать жидкий металл состава C_0 с меньшим содержанием

компонента В. Затвердевание этого металла в зоне $S_{ж-т}$, часть объема которой составляют кристаллы с низким содержанием легирующего компонента В (C_T), приведет в конечном итоге к снижению концентрации компонента В в периферийных слоях слитка по сравнению с исходным составом сплава C_0 .

По мере увеличения времени затвердевания зона объемного затвердевания S перемещается к центру слитка. Одновременно за счет диффузии компонента В и циркуляции металла концентрация элемента В в центральной зоне слитка оказывается более высокой, чем в сплаве состава C_0 . Таким образом, после окончательного затвердевания слитка его периферийные слои обеднены легирующим компонентом В по сравнению с его расчетным содержанием в сплаве, а в центральной части слитка его концентрация оказывается выше расчетной.

Подобное распределение легирующего компонента по сечению слитка соответствует прямой зональной ликвации.

Рассмотренная модель механизма формирования химической неоднородности титановых слитков подтверждается результатами исследований химического состава титановых слитков. На рис. 5.6 представлены результаты анализа химического состава металла по горизонтальному сечению слитков диаметром 350 мм, полученных методом двойного переплава. Изучалось изменение содержания меди в сплаве ВТ10 (расчетное содержание меди 8 %), никеля в сплаве титана с 8 % Ni, молибдена и хрома в сплаве ВТ15, железа в сплаве ВТ7.

Никель, хром, медь и железо, понижающие температуру плавления в бинарных сплавах, богатых титаном, обогащают центральные зоны слитков. В этих системах коэффициент распределения $K < 1$. Молибден повышает температуру плавления титана, и $K > 1$. В данной системе образующийся в процессе кристаллизации жидкий металл (зона S на рис. 5.5) не обогащается, а обедняется молибденом. По этой причине центральная зона слитка содержит молибдена меньше, чем на периферии (кривая 1 на рис. 5.6).

Таким образом, в период затвердевания слитков из титановых сплавов получают развитие физические процессы, которые вызывают образование прямой зональной ликвации:

- ◇ разделительная диффузия при кристаллизации сплава, приводящая к образованию твердой и жидкой фаз различного химического состава;

- диффузия компонентов с более высокой растворимостью в жидком металле, чем в твердом, из зоны объемного затвердевания в жидкий металл, находящийся в контакте с зоной затвердевания;
- циркуляция жидкого и жидко-твердого металла в период затвердевания металла, обусловленная естественной или вынужденной конвекцией, приводящая к переносу жидкого металла, обогащенного легирующим компонентом для сплавов с $K < 1$ или обедненного для сплавов с $K > 1$, из зоны затвердевания в центральную часть слитка.

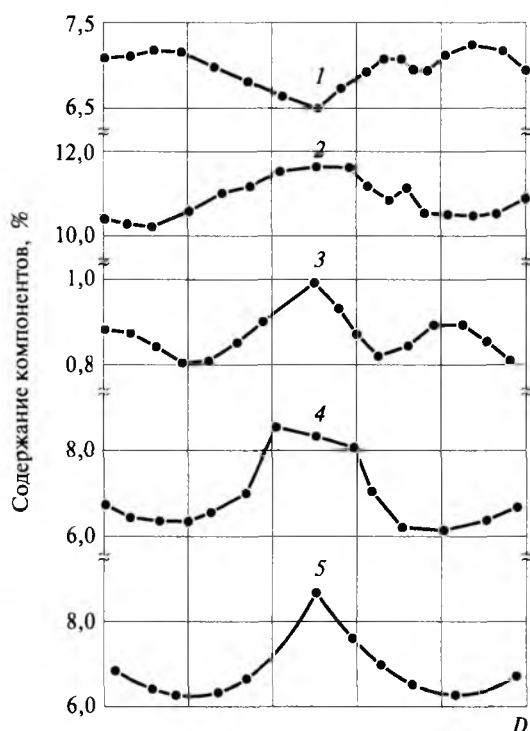


Рис. 5.6. Распределение легирующих компонентов в поперечном сечении установившейся части слитков диаметром 350 мм:

1 — молибден в сплаве BT15; 2 — хром в сплаве BT15; 3 — железо в сплаве BT7; 4 — медь в сплаве Ti + 8 %Cu; 5 — никель в сплаве Ti + 8 %Ni

С увеличением температурного интервала кристаллизации сплава, уменьшением коэффициента распределения (при $K < 1$) или его увеличением (при $K > 1$), а также с ростом диаметра слитка разница в химических составах периферийной и центральной зон слитков из титановых сплавов возрастает.

Основные методы борьбы с прямой зональной ликвацией в слитках из титановых сплавов должны быть направлены на: снижение интенсивности циркуляции жидкого металла в процессе затвердевания и выбор сплава, имеющего небольшой интервал кристаллизации и коэффициент распределения $K \approx 1$.

Интенсивность циркуляции жидкого металла может быть уменьшена за счет выбора соответствующей мощности электрической дуги и изменения знака и напряженности электромагнитного поля, создаваемого соленоидом во время плавки расходного электрода.

5.5. Производство слитков с использованием гарнисажной плавки

Слитки из большинства конструкционных металлических сплавов (на основе железа, алюминия, меди, магния, никеля и др.) изготавливают по следующей технологической схеме: 1) наплавление в печи большой массы жидкого металла; 2) специальная обработка металла в жидком состоянии (рафинирование, раскисление, модифицирование); 3) перелив жидкого металла в изложницу или кристаллизатор.

Ввиду значительной химической активности титана при высоких температурах, особенно в жидком состоянии, подобная схема изготовления слитков долгое время не находила практического применения. Однако в последние годы были разработаны и опробованы способы получения слитков из титановых сплавов с применением гарнисажной плавки, которая позволяет расплавить в плавильном тигле необходимое количество металла с последующим его сливом в изложницу.

Технологический процесс производства слитков при гарнисажной плавке существенно отличается от вакуумно-электродугового. В гарнисажном тигле вначале наплавляется необходимое количество жидкого металла, который затем сливается в изложницу для получения слитка. Для расплавления металла используют электрическую дугу, электронно-лучевые пушки и плазмотроны. Наиболее распространены вакуумные электродуговые гарнисажные печи с расходным электродом.

Сущность гарнисажного способа плавки в электродуговых печах заключается в следующем. Жидкий металл наплавляется в гарнисажном плавильном тигле за счет нагрева и расплавления торцевой части расходуемого электрода и стекания капель жидкого металла в медный водоохлаждаемый тигель. Нагрев и расплавление торцевой части расходуемого электрода осуществляются электрической дугой, горящей между расходуемым электродом и ванной жидкого металла. После наплавления необходимой массы жидкого металла его сливают в изложницу и получают слиток.

Расходуемый электрод, как и при вакуумно-дуговой плавке, в большинстве случаев получают путем прессования титановой губки, содержащей легирующие компоненты и производственные отходы. По химическому составу отпрессованный расходный электрод соответствует той марке сплава, из которого изготавливается слиток (технологию изготовления расходных электродов см. в гл. 5).

Главное преимущество гарнисажной плавки по сравнению с вакуумно-дуговой в кристаллизаторе состоит в надежном удалении из расплава твердых частиц, имеющих более высокие плотность и температуру плавления, чем основной металл. Эти частицы во время плавки осаждаются на дно плавильного тигля и при правильно выбранной технике разлива металла не попадают в изложницу. Другим важным преимуществом гарнисажной плавки является получение слитка однородного химического состава, что обусловлено большим объемом жидкого металла и довольно длительным пребыванием металла в жидком состоянии, что способствует полному растворению легирующих компонентов.

Однако технологическому процессу производства слитков с использованием гарнисажной плавки присущи некоторые недостатки, резко ограничивающие его применение.

Основной недостаток состоит в том, что вся масса наплавленного в гарнисажном тигле жидкого металла сливается в изложницу за относительно короткое время. В слитке формируется глубокая усадочная раковина, а осевая часть слитка поражается пористостью. Эти дефекты не позволяют использовать полученный слиток непосредственно для обработки давлением. Для устранения этих дефектов полученный слиток используют в качестве расходного электрода, который вновь переплавляют в кристаллизаторе вакуумной электродуговой печи.

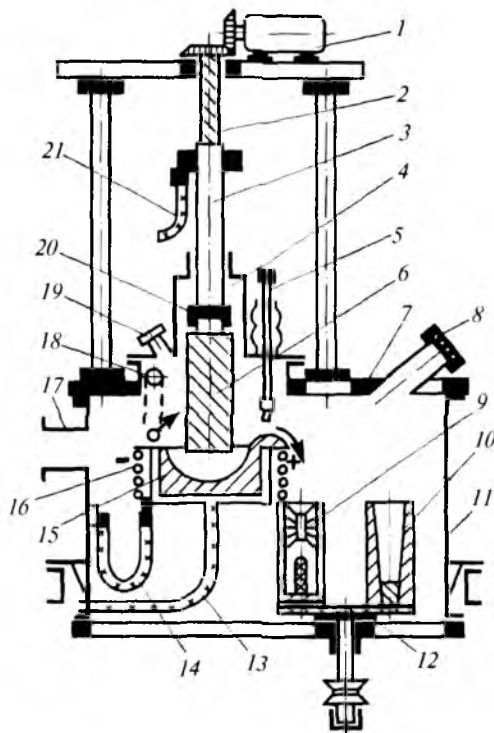


Рис. 5.7. Принципиальное устройство гарнисажной печи:

1 – привод электрододержателя; 2 – ходовой винт; 3 – электрододержатель; 4 – камера электрода; 5 – вспомогательный электрододержатель с нерасходуемым электродом для оплавления настыли на носке; 6 – расходный электрод; 7 – крышка вакуумной камеры; 8, 19 – гляделки; 9 – форма для заливки; 10 – изложница для заливки жидкого металла; 11 – вакуумная камера; 12 – центробежный стол; 13 – шланг водяного охлаждения; 14 – гирлянда гибких кабелей; 15 – водоохлаждаемый тигель; 16 – соленоид; 17 – вакуум-провод; 18 – механизм наклона тигля для слива металла; 20 – захват державки электрода; 21 – верхняя гирлянда кабелей

Принципиальная схема вакуумно-дуговой гарнисажной печи представлена на рис. 5.7. Основной узел печи – охлаждаемый тигель 15 – располагается внутри вакуумной камеры 11, которая вакуум-проводом 17 соединена с вакуумной откачной системой. На съемной крышке печи 7 смонтированы камера для расходного электрода 4, электрододержатель 3 и механизм его перемещения 1. Через крышку вводится вспомогательный электрододержатель 5 с нерасходуемым электродом для оплавления настыли на

сливном носке тигля. Под сливным носком на поворотном или вращающемся (центробежном) столе 12 устанавливают изложницу 10 или форму 9, в которые заливается жидкий металл. Снаружи тигля расположена катушка соленоида 16. Электропитание к тиглю подводится гибкими кабелями 14, а охлаждение — гибкими шлангами 13. Наблюдение за процессом плавки и разливкой осуществляется визуально или дистанционно с помощью оптических или телевизионных устройств через окна-гляделки 8 и 19 в крышке и корпусе печи.

Рабочий процесс в такой печи протекает следующим образом: 1) на специальном стенде около печи, где находится снятая крышка, к электрододержателю подсоединяют расходный электрод; 2) снимают со стенда крышку краном и устанавливают на вакуумную камеру, располагая расходный электрод 6 по оси тигля; 3) вакуумируют печь; 4) подают напряжение от источника питания на электрододержатель и тигель; 5) опускают электрод до короткого замыкания и возбуждают дуговой разряд; 6) некоторое время прогревают электрод и тигель на малой мощности; 7) поднимают ступенчато или сразу мощность дуги до рабочей; 8) сплавляют расходный электрод; 9) сливают наплавленный металл через носок, наклоняя тигель специальным механизмом 18 относительно горизонтальной оси, проходящей под сливным носком.

Конструктивные схемы вакуумно-дуговых гарнисажных печей по способу разливки металла из тигля в изложницу могут быть разделены на следующие группы:

печи, в которых слив металла из плавильного гарнисажного тигля в изложницу осуществляется при горящей электрической дуге; печи с разливкой металла из тигля, осуществляемой после отключения электрической дуги.

На рис. 5.8 представлена схема вакуумно-дуговой гарнисажной печи ДТВГ-0,6ПЦ, которая используется для производства слитков. Особенностью конструкции этой печи является наличие двух литейных (заливочных) камер 9 и плавильной камеры 5, которые обособлены друг от друга. При этом литейные камеры, где установлены изложницы, стационарны, а плавильная камера может наклоняться для слива металла в изложницу, что позволяет вести слив металла при горящей дуге. При наклоне плавильной камеры жидкий металл из подсоединенного к ней снизу тигля 7

через носок сливается на лоток *10* и по нему передается в литейную камеру, где через воронку *11* заливается в изложницу *12*.

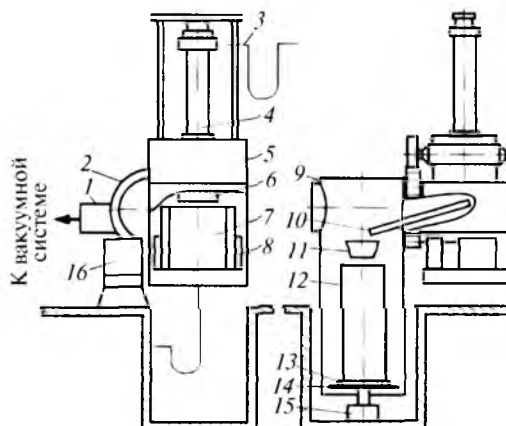


Рис. 5.8. Вакуумно-дуговая гарнисажная печь ДТВГ-0,6ПЦ:

1 — вакуумный патрубок; *2* — зубчатый сектор; *3* — токоподвод; *4* — штук-электроподдержатель с гидроприводом; *5* — плавильная камера; *6* — электрод; *7* — тигель; *8* — соленоид; *9* — заливочная камера; *10* — сливной лоток; *11* — воронка; *12* — кристаллизатор (изложница, форма); *13* — поддон; *14* — центробежный стол; *15* — механизм вращения; *16* — привод механизма наклона печи

Печь ДТВГ-0,6ПЦ имеет две заливочные камеры, расположенные симметрично относительно плавильной, что позволяет существенно увеличивать производительность печи. Масса расходуемого электрода равна удвоенной емкости плавильного тигля.

После наплавления необходимой массы металла его сливают в изложницу, установленную в одной из литейных камер на центробежном столе *14*, который вращается от привода *16*, расположенного под камерой на отдельном фундаменте. После слива металла печь возвращают в вертикальное положение, снова зажигают дугу, расплавляют вторую половину расходуемого электрода и разливают металл в изложницу, находящуюся во второй литейной камере. К обеим литейным камерам подсоединены автономные вакуумные системы.

На рис. 5.9 представлена схема плавильной гарнисажной печи, в которой применяется тигель специальной коробчатой формы *4*. После наплавления необходимой массы металла тигель поворачивается вокруг горизонтальной оси и металл сливается в изложницу *8*

через летку, которая после поворота тигля располагается в его нижней части. Слив металла производится без отключения электрической дуги.

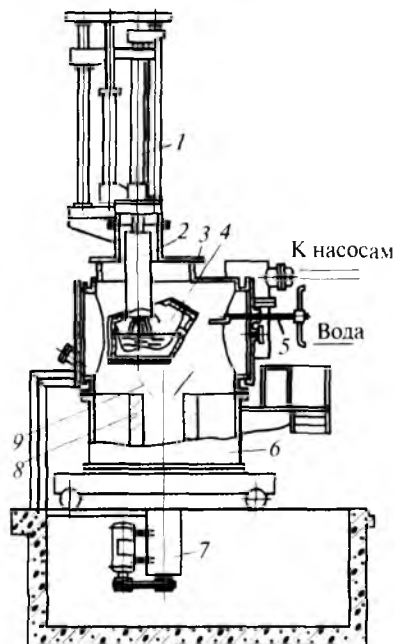


Рис. 5.9. Схема устройства дуговой гарнисажной печи с затопляемой леткой:

1 — электрододержатель; 2 — расходный электрод; 3 — плавильная вакуумная камера; 4 — тигель с затопляемым отверстием-леткой; 5 — электрод для прожога сливного отверстия; 6 — литейная камера; 7 — центробежная машина; 8 — изложница; 9 — воронка

Весьма перспективен способ гарнисажной плавки ГРЭ (гарнисаж — расходный электрод). Способ осуществляется следующим образом: 1) наплавляют в медном водоохлаждаемом тигле жидкий металл с помощью обычного прессованного расходного электрода; 2) сливают часть наплавленного жидкого металла (более половины) в изложницу для получения слитка. Оставшийся в тигле металл затвердевает на стенках медного тигля, образуя гарнисаж; 3) извлекают гарнисаж из тигля и используют его в качестве расходного электрода, который приваривается к электрододержателю в плавильной печи; 4) закладывают в плавильный медный тигель шихту в количестве 50–70 % объема тигля; 5) зажигают дугу. Шихтой для плавки служат прессованные брикеты из титановой губки и стружки, а также кусковые отходы произвольной формы, размеры которых соизмеримы с габаритами рабочего пространства тигля; 6) расплавляют между шихтой и рас-

ходуемым электродом кусковую шихту и расходуемый электрод (гарнисаж от предыдущей плавки); 7) снова сливают часть наплавленного металла в изложницу для получения слитка; 8) повторяют цикл.

При данном способе плавки необходимо прессовать расходуемый электрод только в первой плавке. В связи с этим эффективность процесса возрастает. Этот способ позволяет вводить в плавку любую долю оборотных отходов, благодаря чему резко сокращается расход первичных металлов при производстве слитков.

Производство слитков с использованием гарнисажной плавки и особенно плавки по способу ГРЭ имеет ряд преимуществ по сравнению с их производством в вакуумных электродуговых печах:

- ◇ получаемые слитки однородны по химическому составу, и в них отсутствуют включения нерастворившихся частиц тугоплавких элементов;
- ◇ в плавку можно вовлекать большое количество оборотных отходов;
- ◇ высокая скорость охлаждения жидкого металла в изложнице способствует формированию слитка мелкокристаллической структуры.

Однако присущие технологическому процессу производства слитков с использованием гарнисажной плавки недостатки ограничивают использование данного метода в промышленности. Так, вся масса наплавленного в гарнисажном тигле жидкого металла должна сливаться в изложницу за относительно короткое время. Поэтому формирование слитка происходит в неблагоприятных тепловых условиях. В слитке образуются различные дефекты — зональная ликвация, усадочная пористость, крупная усадочная раковина и т.д., которые не позволяют использовать полученный слиток непосредственно для обработки давлением. Чтобы устранить эти дефекты, слиток вновь переплавляют в вакуумных электродуговых установках.

По этой причине гарнисажная плавка с расходуемым электродом в настоящее время применяется в отдельных случаях для производства заготовок малого диаметра или слитков, используемых в качестве расходных электродов для второго переплава на вакуумных электродуговых печах.

После решения ряда технических вопросов гарнисажная плавка по способу ГРЭ может найти широкое применение. Она позволит осуществить коренное совершенствование технологического процесса производства титановых слитков, обеспечивая значи-

тельное снижение трудоемкости, повышение химической однородности слитков и возможность вовлечения в плавку любых количеств оборотных шихтовых материалов.

Благодаря разделению зон плавления и кристаллизации изложница при гарнисажной плавке не является устройством, в котором осуществляется плавление металла, в связи с чем возникает возможность изготавливать слитки любой формы, а также разного рода фасонные заготовки для обработки давлением.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Одним из основных дефектов титановых слитков является неоднородность металла слитка по химическому составу. Назовите причины, приводящие к образованию этого дефекта.
2. Объясните природу образования периодической химической неоднородности металла слитка.
3. С помощью каких технологических приемов можно избавиться от периодической химической неоднородности в титановых слитках?
4. Какие легирующие компоненты, входящие в состав сплавов, могут испаряться в процессе плавки и вызывать химическую неоднородность слитков? Объясните механизм образования химической неоднородности металла в случае испарения легирующего компонента.
5. Назовите технологические параметры, влияющие на степень развития химической неоднородности титанового слитка в результате испарения при плавке легирующего компонента.
6. Проведите анализ механизма формирования прямой и обратной зональной ликвации.
7. Назовите физические процессы, развивающиеся в период затвердевания слитка из титанового сплава, которые приводят к образованию прямой зональной ликвации.
8. Назовите основные методы борьбы с прямой зональной ликвацией в слитках из титановых сплавов.

6.1. Основные особенности производства отливок из титановых сплавов

История развития литейного производства заготовок из титановых сплавов насчитывает всего 60–70 лет. В 1948 г. впервые в мире была получена первая партия небольших слитков титана массой 2 т, а в конце 1950-х – начале 1960-х гг. – первая партия фасонных отливок. Производство титана в СССР началось в 1950 г. и нарастало очень быстро. В 1980 г. в СССР производилось титана больше, чем во всех зарубежных странах, вместе взятых.

Задержка на 10 лет с внедрением фасонного литья отливок в машиностроении связана в основном с тем, что известные технологические процессы, оборудование, плавильные печи, применяемые для получения отливок из чугуна, стали, цветных металлов, оказались непригодны для производства отливок из титановых сплавов из-за чрезвычайно высокой химической активности титана в жидком состоянии: нет огнеупорных и других материалов, которые бы не реагировали с жидким титаном.

В гл. 2 показано, что при высоких температурах титан чрезвычайно энергично взаимодействует с атмосферными и другими газами. Растворяясь в титане даже в незначительных количествах, они делают металл практически непригодным для использования в качестве конструкционного материала.

Высокая химическая активность титана выдвигает ряд требований к технологическому процессу изготовления отливок, который состоит из следующих основных этапов: расплавление необходимого

количества металла в плавильной печи; перелив жидкого металла из печи в литейные формы; заполнение рабочей полости литейной формы расплавом; затвердевание и охлаждение отливки в форме.

Сущность требований, предъявляемых на всех этапах изготовления отливок из титановых сплавов, заключается в том, что необходимо так осуществить технологический процесс, чтобы интенсивность взаимодействия титана или его сплавов с газовой средой, материалом плавильной печи и материалом литейных форм была минимальной.

Подобные требования к технологическому процессу плавки и литья титановых сплавов были практически реализованы к началу 1960-х гг.

К настоящему времени разработано и эксплуатируется ряд высокопроизводительных плавильно-заливочных установок, усовершенствованы технологические процессы изготовления литейных форм и определены оптимальные режимы их тепловой обработки, что значительно повысило их термохимическую стойкость, создаются системы автоматизированного проектирования технологических процессов литья, совершенствуются процессы формирования отливок, разрабатываются новые процессы с использованием элементов «водородной технологии».

Основное требование к технологическому процессу производства отливок из титановых сплавов — исключение или сведение к минимуму насыщение металла примесями на всех его этапах — реализуется следующим образом.

На *этапе плавления* взаимодействие расплавляемого и жидкого металла с газами атмосферы практически исключается, так как плавка проводится в вакууме. В качестве источника тепловой энергии используют в основном электрическую дугу, а также электронный луч и плазму, которые не загрязняют расплав примесями. Для плавки и наплавления определенной массы металла применяют гарнисажные тигли — графитовые или медные, в которых исключается контакт жидкого металла с материалом тигля и, следовательно, не происходит заметного увеличения доли примесей (например, углерода при плавке в графитовых тиглях).

На *этапах перелива жидкого металла* из тигля в литейные формы, заполнения литейной формы и охлаждения затвердевшей отливки исключение взаимодействия титана с газами атмосферы достигается тем, что все эти операции осуществляются также в ва-

кууме. Для плавки и литья отливок применяют специальные вакуумные плавно-заливочные установки, в которых осуществляются плавка, заливка и формирование отливок.

На *этапах заполнения форм* расплавом, затвердевания и охлаждения отливки в металл внедряется наибольшее количество элементов – примесей. Основная причина – химическое взаимодействие титанового сплава с материалом литейной формы и газами, которые выделяются из формы в результате ее нагрева до высоких температур металлом отливки. Для изготовления литейных форм применяют наиболее химически стойкие по отношению к титану огнеупорные материалы – графит, электрокорунд, цирконий и др. На основе этих материалов изготавливают формовочные смеси, которые используются для изготовления прессованных и набивных литейных форм, форм, изготовленных по выплавляемым моделям, и оболочковых форм.

Однако химическая инертность материала литейных форм недостаточна и металл отливки обогащается элементами – примесями. Наибольшее количество примесей оказывается в поверхностном слое отливки, что снижает эксплуатационные характеристики литых деталей, ухудшает их механическую обработку. Поэтому проблема повышения химической инертности литейных форм и в настоящее время очень актуальна. Ее решение осуществляется в следующих основных направлениях:

- ◇ изыскание новых композиций формовочных материалов;
- ◇ разработка оптимальных режимов тепловой обработки литейных форм и их подготовки к заливке жидким металлом;
- ◇ нанесение специальных защитных покрытий на рабочую поверхность литейной формы;
- ◇ совершенствование технологического процесса формирования отливок.

Еще одно отличие технологического процесса изготовления отливок из титановых сплавов от традиционного обусловлено иным заполнением расплавом рабочей полости литейной формы, что рождает проблему повторного использования литейных отходов.

Основная задача в период заливки расплава в форму – обеспечение полного ее заполнения жидким металлом. Эта задача существенно усложняется при изготовлении тонкостенных, сложных по конфигурации и крупногабаритных отливок. Так, литейные формы из графитовых формовочных смесей обладают высокой

теплоаккумулирующей способностью и в период заполнения между металлом и литейной формой возникает большой температурный перепад. Эти факторы способствуют интенсивному отводу теплоты от жидкого металла и быстрому понижению его температуры. Если заполнение формы осуществляется под металлостатическим давлением жидкого металла (что характерно для литья других сплавов), то в большинстве случаев литейная форма не будет полностью заполнена жидким металлом.

Чтобы обеспечить заполнение форм при литье титановых сплавов, используют центробежный способ заливки, когда жидкий металл из гарнисажного тигля сливается во вращающиеся с частотой 200—400 об/мин вокруг вертикальной оси литейные формы, что позволяет в несколько раз увеличить скорость течения металла по каналам литейной формы и достичь полного заполнения расплавом рабочей полости литейной формы. Кроме того, центробежный способ заливки оказывает благоприятное воздействие на процесс затвердевания отливок, имеющих форму тела вращения (кольца, трубы и др.). Однако при изготовлении фасонных отливок такое благоприятное воздействие на формирование качественного металла практически отсутствует и помимо этого значительно увеличивается расход металла на литниково-питающую систему, что снижает эффективность технологического процесса литья. Поэтому разрабатываются технологические решения, обеспечивающие улучшение заполняемости, — вакуумно-компрессорное литье, литье в «горячие» формы и др.

Если для большинства традиционно применяемых в изготовлении отливок литейных сплавов проблема использования всех видов отходов (стружка, листовая обрезь, бракованные отливки, литейные отходы и т.д.) в качестве литейных материалов практически решена, то этого нельзя сказать о вовлечении титановых отходов в повторный переплав, что связано с загрязнением некоторых видов титановых отходов вредными примесями и особенностями процесса плавки титановых сплавов самым распространенным сегодня методом — гарнисажной, электродуговой, вакуумной плавки расходного электрода.

Новые технологические решения позволяют вовлекать в повторный переплав отдельные виды титановых отходов. К ним относятся: электронно-лучевая плавка отходов, плавка методом ГРЭ, водородное пластифицирование мелких титановых отходов

(стружка, листовые обрезки и др.) и прессование из них расходных электродов, изготовление расходного электрода сваркой из крупных кусковых отходов, индукционная плавка в «холодном» тигле и др.

Применение методов фасонного литья для изготовления машиностроительных деталей из титановых сплавов вместо поковок и штамповок дает существенный экономический эффект. Коэффициент использования металла $K_{ИМ}$ при производстве деталей обработкой давлением составляет 0,05–0,15, тогда как при фасонном литье $K_{ИМ} = 0,3–0,5$. На 1 т деталей, изготовленных методами фасонного литья, расход металла снижается на 3,3–3,5 т по сравнению с обработкой давлением. Одновременно существенно уменьшается трудоемкость механической обработки на 4,5–4,8 тыс. нормо-ч на 1 т деталей.

6.2. Состав, структура и механические свойства титановых сплавов

По фазовому составу литейные сплавы в отличие от деформируемых представлены только в трех группах:

- ♦ α -сплавы – ВТ1 и ВТ5Л;
- ♦ псевдо- α -сплавы – ВТ20Л и ВТ21Л;
- ♦ $(\alpha + \beta)$ -сплавы – ВТ6Л, ВТ3-1Л, ВТ9Л, ВТ14Л, ВТ35Л.

По химическому составу эти сплавы аналогичны деформируемым, но в литейных сплавах несколько больше допустимое содержание примесей.

Технический титан ВТ1Л и сплав ВТ5Л одними из первых получили широкое распространение для изготовления фасонных отливок. Оба этих сплава относятся к однофазным α -сплавам, характеризуются сравнительно невысокой прочностью, высокими пластичностью и ударной вязкостью, обладают лучшими, чем другие титановые сплавы, литейными свойствами и отлично свариваются всеми видами сварки.

Сплав ВТ20Л содержит небольшое количество молибдена, алюминия, ванадия и циркония. Указанные добавки обеспечивают более высокую прочность, чем у сплава ВТ5Л (см. табл. 6.2), при сохранении хороших литейных и технологических параметров.

В табл. 6.1 представлены химические составы основных промышленных литейных титановых сплавов.

Таблица 6.1. Химический состав литейных титановых сплавов, % (по массе)

Сплав	Al	Mo	V	Другие элементы
BT1Л	—	—	—	—
BT5Л	4,1–6,2	—	—	—
BT6Л	5,0–6,5	—	3,5–4,5	—
BT3-1Л	5,3–7,0	2,0–3,0	—	Cr (0,8–2,3); Si (0,15–0,40); Fe (0,2–0,7)
BT9Л	5,6–7,0	2,8–3,8	—	Zr (0,2–2,0); Si (0,20–0,35)
BT14Л	4,3–6,3	2,5–3,8	0,9–1,9	—
BT20Л	5,5–6,8	0,5–2,0	0,8–1,8	Zr (1,5–2,5)
BT21Л	5,8–7,0	0,4–1,0	0,8–1,5	Zr (4,0–6,0); Cr (0,2–0,5)
BT35Л	2,6–3,6	0,2–1,0	14,8–15,8	Zr (0,2–0,8); Sn (2,5–3,5); Cr (2,5–3,5)

Сплав BT21Л по фазовому составу относится к псевдо- α -сплавам с небольшим содержанием β -фазы в структуре. Более высокое содержание в сплаве циркония, чем в сплаве BT20Л, и добавки хрома привели к повышению механических свойств сплава, что позволяет отнести этот сплав к числу высокопрочных. Однако из-за значительного содержания легирующих компонентов этот сплав имеет повышенный интервал кристаллизации, что несколько ухудшило литейные характеристики сплава.

Сплав BT6Л, двухфазный, имеющий относительно высокий уровень механических свойств, нашел широкое применение.

Сплавы BT3-1Л, BT9Л, BT14Л — двухфазные с довольно значительным содержанием β -фазы. Сплавы обладают высокой жаропрочностью и применяются для изготовления авиационных деталей, работающих при повышенных температурах.

Сплав BT35Л системы Ti–Al–V–Sn–Cr–Mo–Zr — высокопрочный, сочетает хорошие технологические свойства и высокие механические показатели. Характерной особенностью данного сплава является его возможность закаливаться в литейной форме в процессе охлаждения отливки. После термической обработки (старение при 500–550 °С в течение 6–8 ч) прочность металла составляет более 1100 МПа. Для литых деталей невысокая темпера-

тура термообработки не приводит к короблению отливки и ее геометрические размеры остаются неизменными. Однако этот сплав склонен к образованию в отливках пор газового и усадочного происхождения. Поэтому отливки обязательно подвергаются высокотемпературному газостатированию при давлении 1500 атм, температуре 900 °С, время выдержки отливок в газостате — 2 ч.

Таблица 6.2. Гарантированные механические свойства литейных и титановых сплавов при 20 °С

Сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Состояние
BT1Л	343	204	10	Литое
BT5Л	686	618	6	То же
BT6Л	834	736	5	—>—
BT3-1Л	932	814	4	—>—
BT9Л	932	814	4	—>—
BT14Л	883	785	5	—>—
BT20Л	932	834	8	—>—
BT21Л	981	843	4	—>—
BT35Л	795	720	13,2	—>—
BT35Л	1136	982	8,8	Литое + ГИП + старение

6.3. Литейные свойства титановых сплавов

Качество металла фасонных отливок в значительной степени определяется процессами, развивающимися в период затвердевания металла. В этот период в металле могут образоваться усадочные и газовые раковины, усадочная и газовая пористость, кристаллизационные (горячие) трещины, ликвация легирующих компонентов и т.д. Образование и интенсивность развития этих и других дефектов неразрывно связаны с литейными свойствами сплавов, которые определяются его физическими свойствами (температура, плавление, теплоемкость, теплопроводность, скрытая теплота кристаллизации, плотность, вязкость,

поверхностное натяжение, объемная и линейная усадка) и температурным интервалом кристаллизации.

Хорошо известно, что в зависимости от температурного интервала кристаллизации сплава и возникающего в период затвердевания градиента температур по сечению отливки процесс затвердевания может носить:

либо объемный характер, когда снижается жидкотекучесть сплава, возрастает вероятность образования газовой и усадочной пористости, кристаллизационных (горячих) трещин, неоднородного по химическому составу металла отливки (различные виды ликваций); либо последовательный, когда в отливке образуются внешние и внутренне усадочные раковины, от которых при правильно разработанной технологии изготовления отливки легко избавиться; в центральных частях отливки, затвердевающих в последнюю очередь, могут возникнуть дефекты усадочного и газового происхождения; либо объемно-последовательный, когда в отливках могут образоваться все перечисленные выше дефекты, но интенсивность их развития значительно ниже.

Вид затвердевания определяется критерием

$$K = \delta t / J_t,$$

где δt — градиент температур, возникающий в металле отливки в период ее затвердевания; J_t — температурный интервал кристаллизации сплава.

Если $K \ll 1$, получит развитие объемное затвердевание, если $K \gg 1$, последовательное, при $K \approx 1$ — объемно-последовательное.

Титановые литейные сплавы имеют относительно небольшой температурный интервал кристаллизации (см. табл. 6.3), что в целом благоприятно сказывается на литейных свойствах. Этому также способствуют тепловые условия, в которых протекает процесс затвердевания. Ввиду большой разницы температур в период затвердевания между металлом и литейной формой (около 1600–16 500 °С) и значительного коэффициента аккумуляирования теплоты формовочного материала, применяемого для изготовления литейных форм, интенсивность отвода теплоты от отливки довольно велика. Так как коэффициент теплопроводности титановых сплавов низок, то в металле отливок в период их затвердевания образуется значительный градиент температур δt по сечению отливки. Поэтому в большинстве случаев фасонного литья соблюдается условие, при кото-

ром критерий вида затвердевания $K = \delta t / J_t \gg 1$, т.е. происходит последовательное затвердевание металла, развивающееся от поверхности отливки в направлении к центральным ее частям. В отливках, имеющих относительно массивные части, а также в случае использования титановых сплавов с большим температурным интервалом кристаллизации, чем указаны в табл. 6.3, критерий вида затвердевания может принять значение $K \approx 1$ и процесс затвердевания в этом случае будет развиваться объемно-последовательно.

Таблица 6.3. Температурный интервал кристаллизации титановых литейных сплавов

Сплав	$t, ^\circ\text{C}$		Интервал кристаллизации, $^\circ\text{C}$
	Ликвидус	Солидус	
BT1Л	1670	1655	15
BT5Л	1640	1600	40
BT6Л	1650	1590	60
BT3-1Л	1620	1560	60
BT9Л	1620	1560	60
BT14Л	1650	1590	60
BT20Л	1620	1560	60
BT21Л	1630	1550	80

Все это позволяет считать, что применяемые в настоящее время титановые литейные сплавы обладают достаточно удовлетворительными литейными свойствами, обеспечивающими высокое качество отливок. Этот вывод подтверждается многолетней производственной деятельностью литейных титановых цехов и участков.

6.4. Заполняемость литейных форм и факторы, влияющие на нее

Интенсивное охлаждение потока жидкого металла в процессе заполнения литейной формы вызывает интенсивное снижение температуры жидкого металла со скоростью примерно в 10–15 раз выше, чем при литье отливок из алюминиевых сплавов. В связи с этим возникают серьезные осложнения с обеспечением полного заполнения литейной формы жидким титановым сплавом.

вом. Особенно они значительны при изготовлении тонкостенных, сложных по конфигурации и протяженных отливок.

Заполняемость как литейное технологическое свойство зависит от жидкотекучести сплава, теплофизических свойств и начальной температуры литейной формы, геометрических параметров отливки, скорости течения металла по каналам и полостям формы в период ее заполнения. Рассмотрим влияние этих факторов на заполняемость литейных форм титановыми сплавами.

Жидкотекучесть — литейное свойство сплава, определяющее его способность заполнить литейную форму и зависящее от теплофизических свойств сплава (теплоемкости, теплоты кристаллизации, плотности, теплопроводности), вязкости и поверхностного натяжения жидкого металла, температуры литья сплава и температурного интервала кристаллизации сплава.

Обычно жидкотекучесть определяют экспериментально путем литья специальных стандартных технологических проб в виде спиралеобразного прутка определенного сечения, по длине которого судят о жидкотекучести сплава. С целью получения достоверных сравнительных данных по жидкотекучести сплавов технологические пробы на жидкотекучесть (литейные формы) изготавливаются по стандартной, одинаковой для всех проб технологии при неизменных условиях заполнения форм расплавом, что исключает влияние на жидкотекучесть других факторов, связанных со свойствами литейной формы и условиями ее заполнения расплавом.

В титановых, как и в других литейных сплавах, прослеживается четкая взаимосвязь жидкотекучести сплава и его температурного интервала кристаллизации. На рис. 6.1 показано влияние 10 основных легирующих компонентов на температурный интервал кристаллизации, а на рис. 6.2 — влияние ряда элементов на жидкотекучесть титана. Алюминий — основной легирующий компонент в титановых сплавах — не вызывает заметного роста температурного интервала кристаллизации сплава и наиболее эффективно повышает жидкотекучесть титана. Добавки к титану кремния, меди, марганца и др. довольно резко увеличивают температурный интервал кристаллизации и при этом жидкотекучесть титанового сплава заметно уменьшается. Олово, цирконий, молибден и ниобий мало влияют на жидкотекучесть.

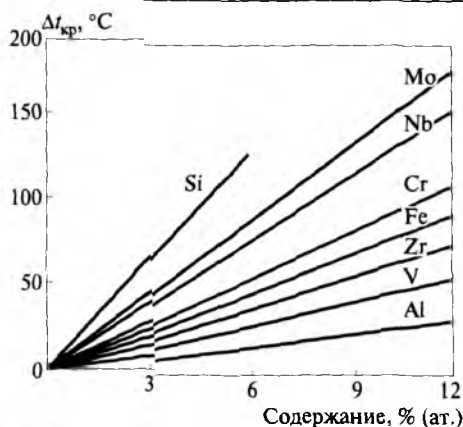


Рис. 6.1. Температурные интервалы кристаллизации $\Delta t_{кр}$ двойных сплавов титана с различными элементами

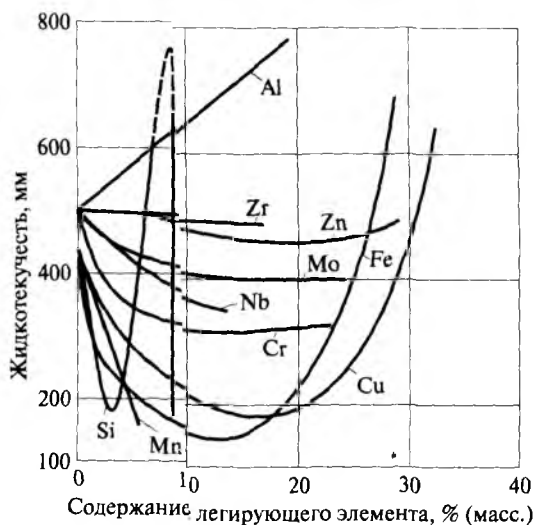


Рис. 6.2. Влияние легирующих элементов на жидкотекучесть титана

Скорость течения металла в период заполнения литейной формы зависит от ряда факторов, в том числе от его вязкости, которая с ростом температуры жидкого металла уменьшается. На рис. 6.3 показано изменение коэффициента кинематической вязкости титана в зависимости от его температуры. Из приведенных данных следует, что при повышении температуры от 1700 до 2100 °C вязкость титана снижается в 7 раз и соответственно увеличивается их жидкотекучесть. Экспериментальные исследования и расчеты показывают, что при перегреве жидкого металла на 300 °C выше

температуры ликвидуса жидкотекучесть возрастает на 35–60 %. На практике использование этого технологического приема существенно ограничивается, так как с ростом температуры заливки резко повышается химическое взаимодействие расплавленного титана с материалом литейной формы, в результате чего металл насыщается вредными примесями, а в отливках возникают поверхностные и внутренние дефекты.

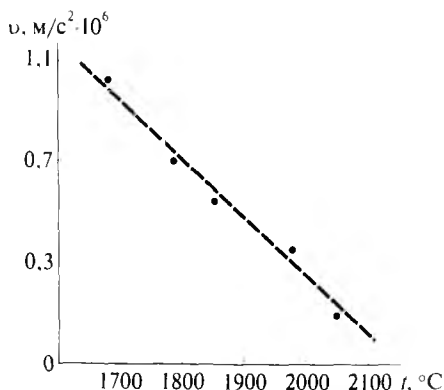


Рис. 6.3. Изменение коэффициента кинематической вязкости титана в зависимости от температуры

Титановые сплавы преимущественно плавят в графитовых гарнисажных тиглях. Гарнисаж — слой затвердевшего титанового сплава на внутренней поверхности плавильного тигля, который изолирует жидкий металл от прямого контакта с материалом тигля, что предотвращает насыщение металла углеродом в результате интенсивно развивающегося взаимодействия расплава с материалом тигля. Поэтому перегрев жидкого металла выше температуры ликвидуса на 250–500 °C приводит к недопустимому насыщению металла вредными примесями, вследствие чего практически невозможно увеличить жидкотекучесть путем повышения температуры литья титановых сплавов.

При изготовлении тонкостенных отливок заполняемость узких каналов и полостей в некоторой степени зависит от капиллярных сил, определяемых коэффициентом поверхностного натяжения жидкого металла и краевым углом смачивания θ .

На рис. 6.4 представлены данные, показывающие, как изменяется поверхностное натяжение титана в зависимости от содержания легирующих компонентов. При малых концентрациях легирующих компонентов поверхностное натяжение титана возрастает

ет и наиболее существенно — при легировании титана алюминием и цирконием.

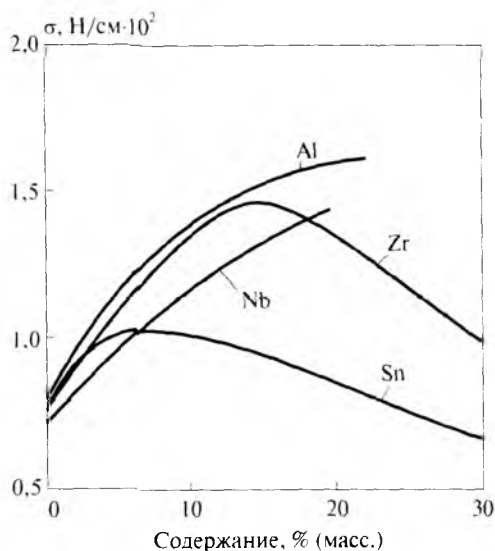


Рис. 6.4. Влияние легирующих элементов на поверхностное натяжение σ титана

Если жидкий металл смачивает материал литейной формы (краевой угол смачивания $\theta < 90^\circ$), то капиллярные силы способствуют заполнению тонких сечений, а при $\theta > 90^\circ$ — препятствуют ему.

В табл. 6.4 приведены значения угла смачивания θ сплавом ВТ5Л различных формовочных материалов.

Таблица 6.4. Значения угла смачивания сплавом ВТ5Л формовочных материалов

Формовочный материал	Диоксид циркония	Электрокорунд	Магnezит	Графит
Краевой угол смачивания θ , град	135	120	107	90/0

Отливки из титановых сплавов в основном изготавливают в формах из графитовых формовочных смесей.

Краевой угол смачивания графита титаном равен 90° при температуре 20°C и 0° при 800°C . Это говорит о том, что капиллярные силы при литье отливок в графитовые формы способствуют заполнению тонких сечений расплавом. Однако многие литейные формы

изготавливают из порошкового графита. Они имеют пористую структуру и пронизаны мельчайшими капиллярными каналами. Под действием капиллярных сил жидкий металл при определенных условиях проникает в поверхностные слои формы, образуя на поверхности отливок трудноотделимый химико-механический пригар.

В [3] изучалась жидкотекучесть различных титановых литейных сплавов. Для определения жидкотекучести проводилась заливка спиральной технологической пробы на жидкотекучесть, пруток которой имел треугольное сечение: высота 15 мм, основание 10 мм. Заполнение форм осуществлялось при температуре металла 1800–1830 °С.

Данные по жидкотекучести исследованных сплавов приведены в табл. 6.5. Как видим, наиболее высокой жидкотекучестью обладает сплав ВТ5Л, так как алюминий — единственный легирующий компонент в сплаве ВТ5Л — снижает вязкость жидкого титана и повышает теплоту кристаллизации, что способствует росту скорости течения металла по каналам литейной формы в период ее заполнения и увеличению продолжительности пребывания сплава в жидком состоянии.

Таблица 6.5. Значения жидкотекучести титановых сплавов

Сплав	ВТ1Л	ВТ5Л	ВТ9Л	ВТ21Л
Длина залитой пробы, мм	520	560	505	460

В сплавы ВТ9Л и ВТ21Л кроме алюминия введены другие легирующие добавки — молибден, железо, хром, кремний и цирконий, которые увеличивают температурный интервал кристаллизации сплавов и их вязкость в жидком состоянии. По этим причинам жидкотекучесть данных сплавов ниже, чем у сплава ВТ5Л.

Теплофизические свойства литейных форм существенно влияют на заполняемость. На рис. 6.5 показано влияние цилиндрических прутков диаметром 5 мм, расположенных в форме горизонтально; при этом рис. 6.5, а соответствует литейной форме, изготовленной по выплавляемым моделям из керамического формовочного материала (коэффициент аккумуляции теплоты $\sigma_{\text{ф}}$ такой формы равен $3,0 \frac{\text{кВт} \cdot \text{с}^{1/2}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$); рис. 6.5, б — формам, изготовленным по выплавляемым

моделям из графитовой формовочной смеси ($\sigma_{\text{ф}} = 4,7 \frac{\text{кВт} \cdot \text{с}^{1/2}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$), и рис. 6.5, σ – формам, изготовленным прессованием из графитовой формовочной смеси ($\sigma_{\text{ф}} = 5,4 \frac{\text{кВт} \cdot \text{с}^{1/2}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$). Как видим, с увеличением интенсивности охлаждения металла (увеличение $\sigma_{\text{ф}}$) заполняемость существенно снижается.

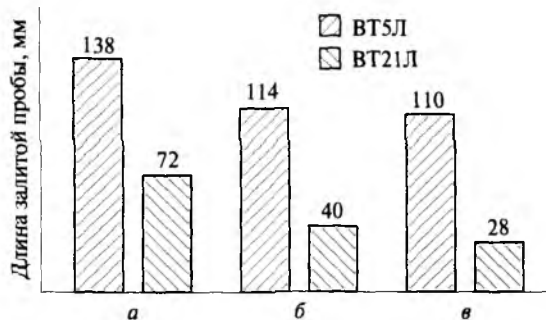


Рис. 6.5. Влияние на заполняемость длины технологических проб, изготовленных из сплавов VT5Л и VT21Л:

а – формы, изготовленные по выплавляемым моделям из электрокорунда; *б* – формы, изготовленные по выплавляемым моделям из графитовой формовочной смеси; *в* – формы, полученные прессованием графитовой формовочной смеси

Так как сплав VT21Л имеет более низкую жидкотекучесть, чем сплав VT5Л, то заполняемость сплава VT21Л оказывается невысокой.

Подогрев литейных форм перед их заливкой повышает заполняемость. Но нагрев форм до 300–350 °С увеличивает заполняемость незначительно – всего на 10–20 %. Подогрев применяемых в настоящее время форм из графитовых или керамических формовочных материалов до 1000–1200 °С привел бы к существенному улучшению заполняемости. Однако при таких высоких температурах происходит интенсивное химическое взаимодействие жидкого металла с материалом формы и соответственно недопустимое насыщение металла вредными примесями и образование прира на отливках.

На рис. 6.6 представлены данные, показывающие, как влияют геометрические параметры (диаметр канала) технологической

пробы на их заполняемость сплавами ВТ5Л и ВТ21Л. С увеличением диаметра прутковой пробы с 5 до 15 мм заполняемость возрастает в 2,5–4,0 раза.

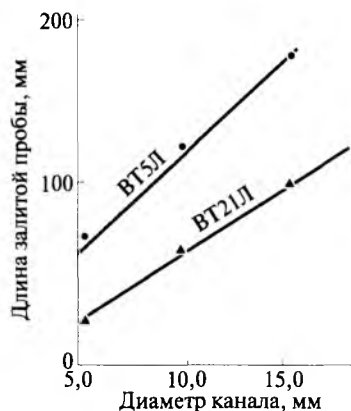


Рис. 6.6. Влияние диаметра канала технологической пробы на заполняемость

Скорость течения металла по каналам литейной формы оказывает наиболее существенное влияние на заполняемость литейных форм. На рис. 6.7 представлены результаты расчетов, подтвержденные производственными данными, о влиянии скорости течения металла по каналам литейной формы на их заполняемость. Увеличение скорости течения расплава с 0,3 до 2,0 м/с в 4 раза повышает заполняемость.

Таким образом, реально обеспечить существенное повышение заполняемости литейных форм жидким титановым сплавом можно только путем значительного увеличения скорости течения металла по каналам и полостям литейной формы.

В современных плавно-заливочных установках большинство титановых отливок получают методом центробежного литья с вертикальной осью вращения стола центробежной машины, на котором закрепляют металлический контейнер с линейными формами. Под действием возникающей в процессе вращения центробежной силы скорость потока жидкого металла в рабочей полости формы значительно возрастает.

Скорость течения металла может быть также увеличена путем воздействия на металл избыточного давления инертных газов (вакуумно-компрессионное литье) или за счет применения специальных машин под давлением с камерой прессования.

Для изготовления простых по конфигурации отливок иногда применяют способ заполнения литейных форм расплавом под действием металлостатического напора, создаваемого жидким металлом.

6.5. Усадочные процессы

В процессе затвердевания и охлаждения затвердевшего металла развиваются усадочные процессы, приводящие к сокращению объема металла отливки и образованию в ней усадочных раковин и пористости, остаточных внутренних литейных напряжений. Степень развития этих дефектов определяется коэффициентами, характеризующими объемную и линейную усадку сплава (см. табл. 6.6).

Таблица 6.6. Объемная и линейная усадка титановых сплавов

Марка сплава	BT1Л	BT5Л	BT9Л	BT21Л
Объемная усадка, %	2,7–3,1	3,0–3,2	2,6–3,0	2,4–2,8
Линейная усадка, %	0,9–1,1	1,0–1,2	0,85–1,05	0,8–1,0

Согласно данным табл. 6.6, по этим показателям титановые сплавы не уступают лучшим литейным сплавам на основе алюминия, железа и других металлов.

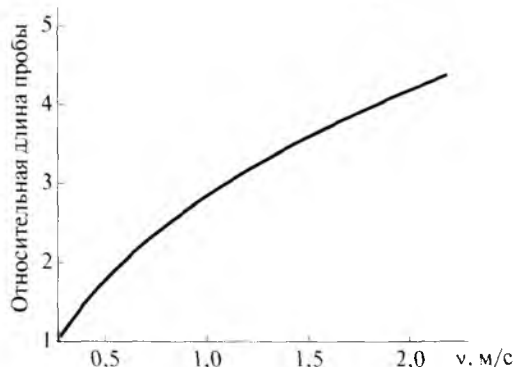


Рис. 6.7. Влияние скорости потока металла на длину заполненного металлом участка формы

Объемы усадочных раковин и усадочной пористости, образующихся при затвердевании сплавов, зависят от химического состава сплава, температурного интервала кристаллизации и тепловых условий охлаждения отливки в период затвердевания.

При последовательном затвердевании (критерий вида затвердевания $K = \delta t / J_f \gg 1$) формируется только усадочная раковина, а при объемном и объемно-последовательном затвердевании ($K \leq 1$) – усадочная раковина и усадочная пористость. При неизменных тепловых условиях охлаждения соотношение объемов усадочной раковины и усадочной пористости определяется температурным интервалом кристаллизации сплава. С его увеличением доля объемной усадки титановых сплавов, приходящаяся на усадочную пористость, непрерывно возрастает (рис. 6.8). В сплавах, температурный интервал кристаллизации которых составляет 150–250 °С, объемы образующихся усадочных раковин и усадочной пористости примерно одинаковы (по 1,5 % объема отливки). Зависимость, представленная на рис. 6.8, построена на основании специальных исследований, проведенных со сплавами систем Ti–Al, Ti–Zr, Ti–Fe, Ti–Si, Ti–Cu. Большинство современных промышленных титановых сплавов имеет небольшой температурный интервал кристаллизации (до 60–75 °С), и по этой причине они мало склонны к образованию усадочной пористости в отливках.

Таким образом, титановые сплавы обладают достаточно высокими литейными характеристиками и такими физическими свойствами, которые позволяют получить фасонные отливки высокого качества.

Основные технологические проблемы, которые возникают при изготовлении отливок из титановых сплавов, связаны: 1) с обеспечением полного заполнения расплавом рабочей полости литейных форм и 2) высокой химической активностью титановых сплавов.

Первая проблема в настоящее время решается с помощью использования центробежного способа литья, при котором, как говорилось выше, разливка металла из плавильного тигля осуществляется во вращающиеся вокруг вертикальной оси литейные формы. Центробежный способ литья широко используется для получения литых заготовок, имеющих форму тела вращения (кольца,

трубы и т.д.). В этом случае условия затвердевания сплава оказываются оптимальными, а качество металла заготовок — высоким.

Применение центробежного способа литья для изготовления фасонных отливок является мерой вынужденной. Существенно улучшая заполняемость, он не создает необходимых условий для требуемого развития процесса затвердевания металла в объеме отливки. Этот недостаток частично компенсируется за счет применения крупногабаритных и массивных литниково-питающих систем, значительно увеличивающих расход металла на изготовление отливок.

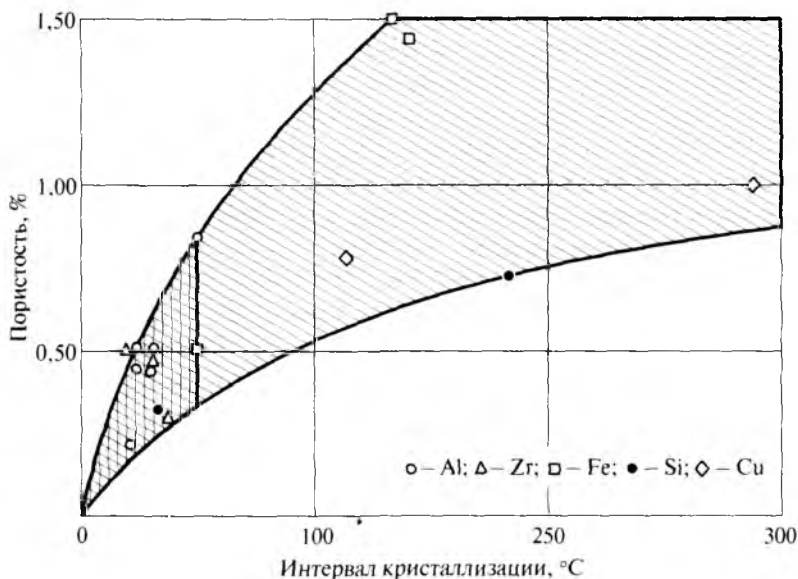


Рис. 6.8. Влияние температурного интервала кристаллизации титановых сплавов на объем усадочной пористости в отливках

Вторая проблема — высокая химическая активность титановых сплавов в жидком состоянии, приводящая к интенсивному развитию физико-химического взаимодействия отливки с материалом литейной формы и загрязнению металла вредными примесями. Частично данная проблема решается путем применения ряда технологических мероприятий, повышающих химическую инертность литейных форм. В гл. 10 подробно представлена сущность этих мероприятий.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На какие семейства подразделяются титановые литейные сплавы по фазовому составу? Назовите основные элементы, входящие в состав сплавов.
2. Из теории литейных процессов известно, что сплавы, кристаллизующиеся в широком температурном интервале кристаллизации, имеют, как правило, неудовлетворительные литейные свойства. Что можно сказать по этому поводу о титановых литейных сплавах?
3. Титановые сплавы по сравнению с другими распространенными сплавами имеют низкие показатели жидкотекучести и заполняемости рабочих полостей литейных форм расплавом, что приводит к серьезным проблемам изготовления относительно тонкостенных и габаритных отливок. Дайте объяснение этому факту. Укажите пути решения данной проблемы.
4. Объясните влияние теплофизических свойств материала литейных форм на заполняемость рабочих полостей литейных форм.
5. Известно, что с увеличением скорости течения расплава по каналам формы их заполняемость расплавом улучшается. С чем это связано?
6. Какие приемы используют для улучшения заполняемости расплавом литейных форм?
7. Какие достоинства и недостатки имеет центробежный способ литья фасонных отливок из титановых сплавов?

ГЛАВА 7 ПЛАВИЛЬНО-ЗАЛИВОЧНЫЕ УСТАНОВКИ

7.1. Сущность гарнисажной плавки титановых сплавов

Отливки из титановых сплавов получают в плавильно-заливочных установках, совмещающих процессы плавки с заливкой литейных форм и формированием отливок.

Высокая химическая активность титановых сплавов при температурах выше 800–1000 °С и особенно в жидком состоянии обуславливает ряд специфических требований к выбору технологического процесса плавки и литья отливок.

Сущность главного требования заключается в следующем: в процессах нагрева, плавки и литья титановые сплавы не должны вступать в непосредственный контакт с газами атмосферы и материалами элементов конструкций плавильно-заливочной установки. В противном случае высокая реакционная способность титана вызовет насыщение металла продуктами реакций и приведет к недопустимому ухудшению механических свойств сплава.

Для осуществления на практике данного требования к технологическому процессу плавки и литья титановых сплавов разработаны и широко используются специальные плавильно-заливочные установки, которые:

- ◇ обеспечивают создание вакуума или защитной атмосферы (например, из нейтральных газов) в периоды плавки, заливки металла в литейные формы, также в период затвердевания и охлаждения отливки;
- ◇ исключают непосредственный контакт нагретого до высокой температуры металла с конструктивными элементами плавильно-заливочной установки;
- ◇ используют источники теплоты (электрическую дугу, электронный луч, плазму), обеспечивающие нагрев металла до высокой

температуры и не вносящие посторонних продуктов в атмосферу печи или непосредственно в расплав.

Наибольшее распространение получили плавились-заливочные установки, в которых плавка и заливка форм осуществляются в вакууме, а металл нагревается и плавится в гарнисажном тигле с помощью тепловой энергии, выделяемой электрической дугой.

В плавились-заливочных установках наплавляется требуемое количество жидкого металла, осуществляется разливка металла по литейным формам и, кроме того, создаются необходимые условия для обеспечения полного заполнения литейных форм жидким металлом.

Титановые сплавы обладают невысокой жидкотекучестью, поэтому все промышленные плавились-заливочные установки для улучшения заполняемости форм расплавом снабжены устройством, позволяющим производить разливку сплава во вращающуюся форму. Подготовленные под заливку литейные формы устанавливаются в специально изготовленный металлический контейнер, который закрепляется на столе центробежного устройства. Перед разливкой расплава по формам стол приводится во вращение (200–400 об/мин). Под действием центробежных сил значительно возрастает скорость течения металла по каналам формы и улучшается ее заполняемость.

Выбор оптимального разрежения (вакуума) в камере плавились-заливочной установки определяется главным образом химической активностью жидкого титана по отношению к элементам, входящим в состав газовой атмосферы. Термодинамические расчеты и практический опыт показали, что в камере плавились-заливочной установки в период плавки и разливки следует поддерживать давление, не превышающее 0,13–0,67 Па. В этом случае не происходит увеличения содержания в сплаве элементов, входящих в состав воздуха (азот, кислород, водяной пар).

Для создания вакуума все плавились-заливочные установки оборудованы вакуумной системой (комплекс вакуумных насосов, вакуум-проводы, вакуумные датчики, задвижки, вентили и т.д.), которая поддерживает в камере установки требуемое разрежение и производит откачку выделяющихся из металла в процессе его плавки газов из камеры с необходимой скоростью.

В период плавки и разливки может также происходить насыщение металла примесями за счет химических процессов взаимодействия расплавленного металла с материалом плавильного тигля и вовлечения в плавку некондиционных шихтовых материалов. С целью сведения к минимуму насыщения металла элементами, входящими в состав плавильного тигля и других конструктивных элементов установки, применяют электродуговой способ плавки расходуемого электрода в гарнисажном плавильном тигле. Сущность этого способа заключается в следующем (рис. 7.1).

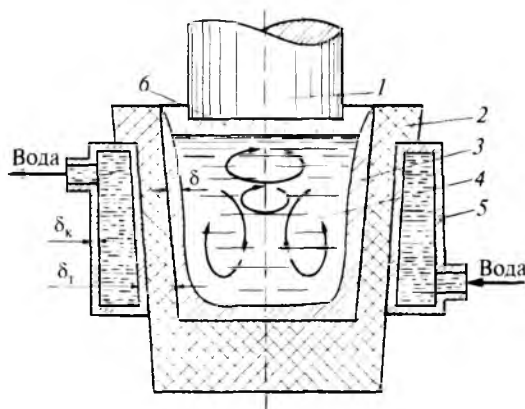


Рис. 7.1. Схема гарнисажного плавильного тигля:

1 — расходный электрод; 2 — плавильный тигель; 3 — слой затвердевшего металла (гарнисаж); 4 — жидкий металл; 5 — водоохлаждаемая камера; 6 — электрическая дуга

Жидкий металл 4 наплавляется в плавильном тигле 2 за счет нагрева и расплавления торцевой части расходного электрода 1 и стекания капель жидкого металла в тигель. Нагрев и расплавление осуществляются электрической дугой 6, горящей между расходным электродом и ванной жидкого металла. В большинстве случаев расходный электрод получают путем переплавки пресованного из титановой губки и легирующих элементов электрода. По химическому составу металл расходного электрода 1 соответствует той марке сплава, из которого изготавливается отливка (см. § 4.2).

Изготовив новый медный или графитовый плавильный тигель и установив его в камеру, проводят первую плавку с целью образо-

вания на стенках тигля гарнисажа 3. После наплавления жидкого металла отключают электрический ток. На внутренних стенках тигля образуется корка затвердевшего металла. Когда образовалась корка (гарнисаж) требуемой толщины δ , оставшийся жидкий металл сливается из тигля.

Перед началом каждой следующей плавки на дно гарнисажного графитового (или медного) тигля укладывают немного кусков титанового сплава (обычно очищенные кондиционные отходы) и между расходным электродом и кусками шихты зажигается электрическая дуга. Расходуемый электрод плавится, и жидкий металл стекает в гарнисажный тигель. Плавку металла ведут до тех пор, пока не будет наплавлена необходимая масса жидкого металла. Затем жидкий металл разливается по литейным формам.

При подобной схеме плавки (гарнисажной) расплавленный металл отделен от стенок тигля слоем гарнисажа и практически не насыщается элементами, входящими в состав материала тигля.

В дуговых гарнисажных печах, применяемых в нашей стране, для плавки титановых сплавов широко используют графитовые тигли как наиболее безопасные в эксплуатации, а также тигли, изготовленные из меди и реже — из нержавеющей стали.

На рис. 7.1 приведена одна из распространенных конструкций графитового тигля с системой водяного охлаждения боковых стенок (5) и охлаждением дна путем теплового излучения. Слив металла из тигля производят через носок при наклоне тигля на $90-100^\circ$. Графитовые тигли изготовляют точением из целой заготовки или путем формовки металлического кожуха графитовыми блоками. Толщина боковой стенки точеных тиглей составляет 20–60 мм, дна — до 100 мм. При плавке в графитовых тиглях, несмотря на наличие гарнисажа, происходит некоторое насыщение металла углеродом и, как следствие, понижение пластичности металла. Поэтому для плавки титановых сплавов перспективно применение металлических гарнисажных тиглей. Однако их использование сдерживается отсутствием радикального решения вопроса взрывобезопасности печей, оборудованных металлическими тиглями с водяным охлаждением.

В процессе плавки толщина гарнисажа δ не должна существенно изменяться, так как при ее увеличении произойдет уменьше-

ние массы сливаемого металла и его температуры, а при ее уменьшении жидкий металл может вступить в непосредственный контакт с материалом тигля, что приведет к значительному насыщению металла примесями. Непосредственный и длительный контакт жидкого металла со стенками тигля (плавка без гарнисажа) недопустим, поскольку может вызвать аварийную взрывоопасную обстановку.

Поддержание оптимальной толщины гарнисажа обеспечивается соответствующим выбором и регулированием мощности электрической дуги и интенсивностью охлаждения тигля.

Таким образом, электродуговая гарнисажная плавка расходного электрода в вакууме практически полностью исключает насыщение металла примесями, но определенное насыщение металла примесями происходит на стадии формирования отливки. Литейные формы для отливок из титановых сплавов изготавливают из наиболее огнеупорных и химически инертных формовочных материалов — графита, электрокорунда, оксида магния и т.д. Однако высокая химическая активность титана и непосредственный контакт жидкого металла с литейной формой неизбежно приводят к развитию химического взаимодействия титана с элементами и соединениями, входящими в состав литейной формы. В наибольшей степени примесями насыщается поверхностный слой отливок, который называют газонасыщенным или альфированным. Обладая повышенной твердостью, газонасыщенный слой существенно ухудшает конструкционную прочность литых деталей, затрудняет их механическую обработку.

Литейные отходы с газонасыщенным слоем не применяют в качестве шихты для плавки металла, используемого для литья ответственных деталей, так как при повторной плавке примеси, за исключением водорода, не удаляются из металла. Сегодня самый распространенный промышленный способ приготовления сплава для фасонного литья отливок из титановых сплавов — электродуговая гарнисажная плавка. Кроме того, разрабатываются и находят промышленное применение методы плавки, в которых сохраняется принцип гарнисажной плавки в вакууме, но вместо электрической дуги — источника тепловой энергии — используют энергию электронного луча или плазмы. Ведутся исследования по применению индукционного способа плавки титановых сплавов в «холодных» тиглях.

7.2. Конструкции электродуговых плавильно-заливочных установок

В литейных цехах и лабораториях эксплуатируются многочисленные плавильно-заливочные установки, различающиеся конструктивными решениями отдельных узлов, габаритами, степенью механизации, производительностью. Но все они имеют общие функциональные узлы, позволяющие осуществлять плавку металла электрической дугой в вакууме, наплавлять металл в гарнисажном тигле и осуществлять процесс формирования отливки.

Основными узлами плавильно-заливочных установок являются: электродуговая гарнисажная печь, камера формирования отливки, механизмы загрузки и выгрузки форм, вакуумная система, источник питания и др.

Для питания электрической дуги во всех типах плавильно-заливочных установок применяется постоянный ток. Переменный ток не обеспечивает стабильности горения дуги; она гаснет в периоды, когда напряжение близко к нулю. В схеме питания электрической дуги постоянного тока прямой полярности катодом служит расходуемый электрод, а анодом — ванна жидкого металла. Плавка такой дугой обеспечивает более высокую температуру наплавляемого металла. Электрическая дуга стабильна и устойчива, если плавка титана осуществляется в вакууме 0,13–0,67 Па. В качестве источников электрического питания вакуумных дуговых гарнисажных печей наибольшее применение получили полупроводниковые выпрямительные устройства на германиевых, кремниевых или селеновых вентилях.

Классификацию конструкций плавильно-заливочных установок производят по признакам, существенно влияющим на конструкцию плавильно-заливочной установки и ее технологические возможности, например по способам разливки металла из гарнисажного тигля по формам. По этому признаку плавильно-заливочные установки можно разделить на установки с разливкой металла: а) при горящей электрической дуге; б) после отключения электрической дуги.

Различные варианты осуществления разливки металла по формам представлены на рис. 7.2.

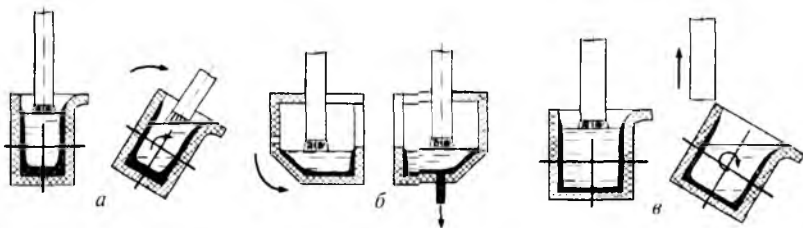


Рис. 7.2. Способы разливки металла в плавильно-заливочных установках при горячей (а, б) и отключенной электрической дуге (в)

Разливка металла при горячей дуге может производиться:

- ◇ либо путем одновременного наклона расходоемого электрода и тигля (рис. 7.2, а), когда наклон узла тигель—электрод осуществляется внутри неподвижного корпуса плавильно-заливочной установки. В установках с небольшой емкостью (лабораторные установки) поворот узла тигель—электрод производится вместе с корпусом плавильно-заливочной установки;
- ◇ либо путем поворота одного тигля специальной (коробчатой) конструкции (рис. 7.2, б), когда в боковой стенке «коробчатого» тигля имеется сливное отверстие (летка), расположенное так, что уровень жидкого металла в процессе плавки до нее не доходит. После наплавления необходимой массы жидкого металла тигель поворачивается на 90° и осуществляется слив металла. При этом относительное положение электрода и жидкой ванны не меняется и разливка металла идет при горячей электрической дуге.

В печах с разливкой металла при горячей дуге не происходит заметного охлаждения металла при его сливе из тигля, что является преимуществом с точки зрения сохранения жидкотекучести расплава и лучшего заполнения литейных форм. Однако эти плавильно-заливочные установки менее надежны в эксплуатации, так как механизм перемещения электрода размещен внутри плавильной камеры и подвержен воздействию теплового излучения и конденсации паров расплавляемого металла; кроме того, многие из них сложнее по конструкции и в обслуживании.

В печах второй группы перед разливкой металла дуга выключается и остаток электрода поднимается, чтобы не мешать повороту тигля (рис. 7.2, в). В период подъема электрода температура жидкого металла в тигле понижается, что несколько уменьшает жидкотекучесть сплава. Этот недостаток печей данной конструк-

ции становится малозаметен в печах большой вместимости, оборудованных механизмами, позволяющими с высокой скоростью осуществлять подъем электрода и поворот тигля при сливе металла.

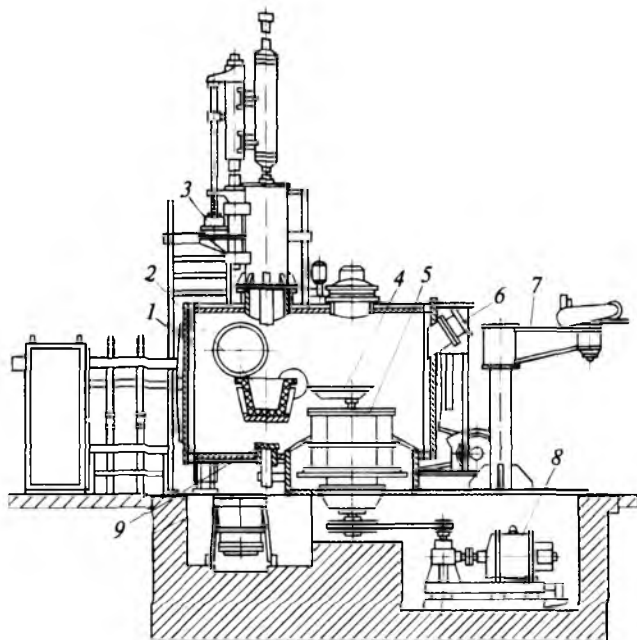


Рис. 7.3. Электродуговая плавильно-заливочная установка 833Д:

1 — плавильный тигель; 2 — вакуумная камера; 3 — механизм подачи электрода; 4 — приемно-направляющий лоток; 5 — металлический контейнер с формами; 6 — смотровое окно; 7 — поворотный кран; 8 — электродвигатель с приводом для вращения стола с контейнером; 9 — площадка для установки и приварки расходного электрода

Вакуумная дуговая плавильно-заливочная установка модели 833Д — одна из наиболее простых и удобных в эксплуатации и предназначена для мелкосерийного производства титановых отливок небольших и средних габаритов (рис. 7.3). Основной узел печи — водоохлаждаемый графитовый гарнисажный тигель 1 расположен внутри цилиндрической вакуумной камеры 2. Снаружи камеры на верхнем фланце установлен механизм подачи электрода 3, состоящий из электродвигателя постоянного тока для рабочей подачи расходного электрода во время плавки и пневмоцилиндра, осуществляющего подъем электрода вверх перед сливом

металла из тигля. С помощью поворотного крана 7 контейнер с литейными формами загружают на центробежный стол, а на площадку 9 устанавливают новый расходимый электрод с целью его приварки к огарку ранее расплавленного электрода. Разливка металла после выключения дуги и подъема электрода производится с помощью гидропривода поворотом тигля вокруг оси, проходящей через сливной носок. Расплав из тигля к форме подается по приемно-направляющему лотку 4. Привод центробежной машины 8 вынесен за пределы вакуумной камеры и состоит из электродвигателя постоянного тока, редуктора и рамы. Частота вращения стола диаметром 1000 мм регулируется бесступенчато от 200 до 600 об/мин. Вместимость тигля — до 130 кг (по жидкому титану), максимальная сила тока дуги 16 кА; рабочее давление 0,67 Па.

В настоящее время широко распространены и другие марки вакуумных дуговых плавильно-заливочных установок, которые по принципу работы аналогичны установке 833Д, но имеют более высокую степень механизации, большую производительность и большую вместимость тигля.

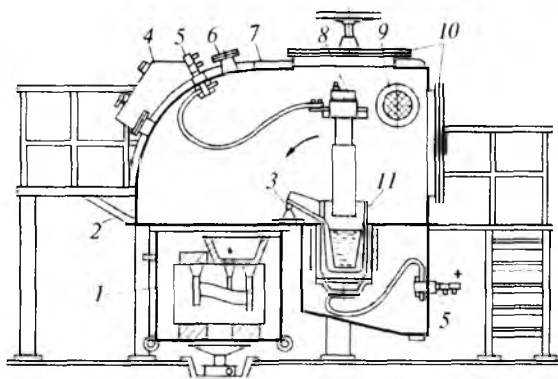


Рис. 7.4. Электродуговая плавильно-заливочная установка «Нева-2»:

1 — камера формирования отливок; 2 — водоохлаждаемый корпус; 3 — механизм наклона тигля; 4 — пульт управления печи; 5 — водоохлаждаемые токоподводы; 6 — смотровые окна; 7 — ребра жесткости для укрепления корпуса печи; 8 — механизм перемещения электрода; 9 — патрубок для подключения вакуумной системы с насосами; 10 — люки для обслуживания печи; 11 — водоохлаждаемый поворотный тигель

На рис. 7.4 представлена схема распространенной промышленной установки типа «Нева-2», в которой разливка металла осуществляется без отключения электрической дуги. После наплав-

ления металла (емкость тигля этой установки 130 кг жидкого титана) одновременно поворачиваются тигель 11 и расходный электрод вместе с механизмом перемещения электрода 8 и медной шиной токоподвода и слив металла осуществляется без отключения электрической дуги.

Кроме описанных конструкций используются также установки типа ВДЛ-4, ОКБ, ДВЛ-250 и др.

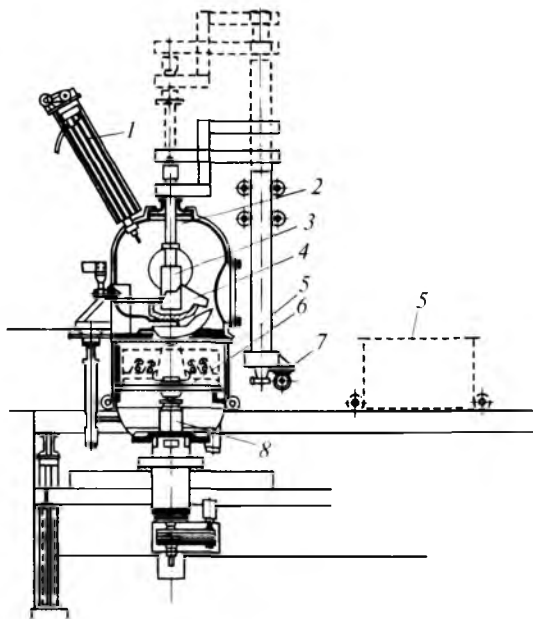


Рис. 7.5. Вакуумная дуговая плавно-заливочная установка ВДЛ-4:

1 — вольфрамовый электрод; 2 — плавильная камера; 3 — расходный электрод; 4 — ко-
робчатый тигель; 5 — заливочная камера; 6 — стол центробежной машины; 7 — механизм
подачи расходного электрода; 8 — центробежная машина

На рис. 7.5 показана схема плавно-заливочной установки ВДЛ-4. Особенность установки состоит в том, что в комплект установки входят две-три самоходные камеры формирования отливок. Это позволяет увеличить производительность установки за счет того, что после плавки и литья плавильная камера отделяется вакуумным шибером от камеры формирования отливок 5. Камера формирования вместе с находящимися в ней литейными формами и отливками откатывается по рельсам. Вместо нее устанавли-

вается следующая камера формирования с литейными формами и подсоединяется к плавильной камере. После соответствующей подготовки наплавляется необходимая масса металла, который разливается по литейным формам.

Камера формирования отливок имеет диаметр 1880 мм и высоту 1170 мм. Центробежная машина 8, приводящая во вращение контейнер с литейными формами в период их заливки расплавом, установлена в приемке стационарно. Частота вращения стола 6 с закрепленным на нем контейнером может изменяться от 50 до 600 об/мин.

Плавильная печь оборудована тиглем коробчатого типа, позволяющим производить разливку металла без выключения дуги. Во время слива металла расходующий электрод 3 опускается вниз вслед за уровнем жидкого металла. С помощью нерасходующего вольфрамового электрода 1 в случае необходимости проплавляются слои затвердевшего металла, перекрывающего сливное отверстие (летку) коробчатого тигля 4. Вместимость тигля — до 200 кг жидкого металла. Средняя производительность установки составляет 100 кг/ч при использовании двух камер формирования отливок.

Если взамен расходующего электрода установить либо электронную пушку, либо плазменную горелку, либо нерасходующий вольфрамовый электрод, то в установке ВДЛ-4 можно применять кусковую шихту (например, литейные отходы) для наплавки жидкого металла вместо расходующего электрода.

Многопозиционная вакуумная дуговая плавильно-заливочная установка ДВЛ-160М имеет высокую степень механизации и производительности. Схема установки приведена на рис. 7.6 и состоит из одной автономной плавильной камеры 3 и трех камер формирования отливок 4, а также стэнда приварки электрода 1. В каждой заливочной камере размещен стол центробежной машины диаметром 2250 мм.

Плавильная камера перемещается на тележке мостового типа 5 над заливочными камерами и стэндом приварки. Стыковка плавильной камеры с камерой формирования производится с помощью вакуумных затворов. В плавильной камере находится графитовый гарнисажный тигель вместимостью 400 кг (по жидкому титану). Механизм поворота тигля с гидروпроводом обеспечивает слив металла за 4—25 с. На верхнем фланце камеры установки раз-

мещен механизм подачи электрода. Установка имеет три отдельные вакуумные системы — плавильной печи, каждой заливочной камеры и стэнда приварки электрода. Вынесенный отдельно пульт позволяет управлять работой установки в полуавтоматическом режиме.

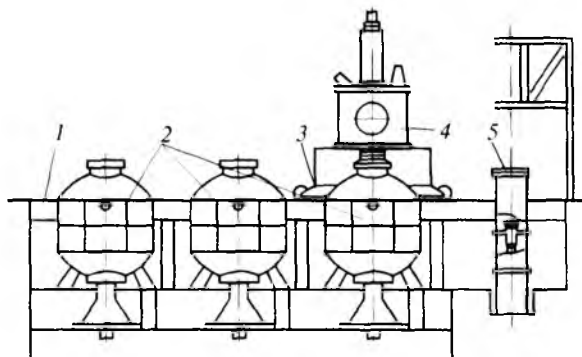


Рис. 7.6. Электродуговая плавильно-заливочная установка ДВЛ-160М:

1 — стэнд приварки электрода; 2 — рельсовый путь; 3 — плавильная камера; 4 — камеры формирования отливок; 5 — тележка мостового типа

За счет применения трех автономных заливочных камер и увеличения вместимости тигля производительность установки ДВЛ-160М в 7 раз выше, чем у установки 833Д. Производительность зависит от длительности производственного цикла, а значительное время цикла затрачивается на охлаждение отливок до низких температур в заливочной камере. В установке ДВЛ-160М этот недостаток устранен за счет того, что плавильная камера после слива металла отсоединяется от заливочной без нарушения вакуума как в плавильной камере, так и в заливочной. Плавильная камера по рельсам перемещается к следующей, подготовленной под заливку камере, подсоединяется к ней и производится плавление металла и заливка форм.

На рис. 7.7 представлена схема плавильно-заливочной установки ДВЛ-250, предназначенной для промышленного получения титановых крупногабаритных отливок сложной конфигурации. Ее особенность в том, что в ее рабочей камере размещены два центробежных стола и разливка расплава из тигля производится на две противоположные стороны. Это позволяет вести вторую

плавку и разливку металла во время охлаждения литейных форм, находящихся в первом контейнере.

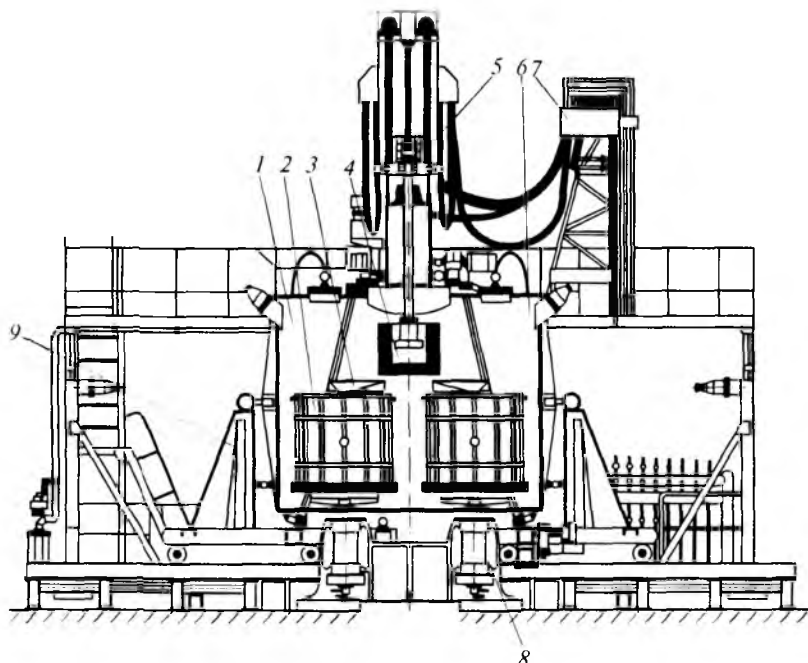


Рис. 7.7. Схема плавильно-заливочной установки ДВЛ-250:

1 — плавильно-заливочная камера; 2 — контейнер с литейными формами; 3 — приемный лоток (воронка) для жидкого металла; 4 — гарнисажный тигель; 5 — механизм подачи электрода; 6 — торцевая крышка рабочей камеры; 7 — токоподвод к электроду; 8 — привод центробежного стола; 9 — тележка для откатывания торцевой крышки

Плавильно-заливочная камера 1 представляет собой горизонтально расположенную конструкцию цилиндрической формы с торцевыми крышками 6, откатывающимися в сторону на специальных тележках 9. На боковой цилиндрической части камеры расположены три патрубка для присоединения вакуумной системы. Приводная станция механизма подачи электрода 5 обеспечивает движение расходоемого электрода вниз и вверх в двух режимах: а) рабочий режим для перемещения электрода вниз во время плавки; б) режим высокоскоростного отброса электрода вверх после наплавления металла в тигле. Графитовый тигель 4, установленный в водоохлаждаемом стальном корпусе, с помощью элек-

электродвигателя поворачивается для слива металла из тигля на 105° в обе стороны.

В нижней части плавильно-заливочной установки смонтированы два центробежных стола 8, которые приводятся во вращение электродвигателями через клиноременную передачу и обеспечивают частоту вращения контейнера с литейными формами от 200 до 400 об/мин.

Вакуумная система установки состоит из двух форвакуумных насосов, одного бустерного насоса, вакуум-проводов и вакуумных затворов, фильтров.

Установка может работать в ручном, полуавтоматическом или автоматическом режимах.

В модернизированной установке ДВЛ-250М для крупногабаритного литья установлен плавильный тигель вместимостью по жидкому титану 600 кг, диаметр расходоуемого электрода 440 мм. За счет частичного изменения конструкции установка снабжена центробежным столом, на котором устанавливается контейнер с формами диаметром 2200 мм и высотой 800 мм вместо 1380×1500 мм.

В табл. 7.1 приведены технические характеристики некоторых плавильно-заливочных установок.

Таблица 7.1. Технические характеристики некоторых плавильно-заливочных установок

Тип установки	Габаритные размеры, м			Вместимость тигля, кг	Диаметр электрода, мм	Длина электрода, мм	Максимальная сила тока, кА	Число центробежных столов	Диаметр контейнеров, мм	Высота контейнера, мм	Средняя производительность по жидкому сплаву, кг/ч
	Длина	Ширина	Высота								
833-Д	6,0	4,3	7,3	130	280	1000	16	1	1000	600	35
ДВЛ-250	12,4	9,7	10,2	400	360	1200	25	2	1380	1500	110
ДВЛ-250М	12,4	9,7	10,2	600	440	1200	37	2	2200	800	160
ДВЛ-160М	13,0	10,0	11,8	400	360	1200	25	3	2250	1800	240

7.3. Гарнисажная плавка независимыми источниками теплоты

Для получения фасонных отливок могут быть использованы плавильно-заливочные установки, в которых металл расплавляется в гарнисажном тигле не только электрической дугой, но и с помощью независимых источников теплоты — электронного луча или плазмы.

На рис. 7.8 представлены варианты гарнисажной плавки с применением независимых источников теплоты.

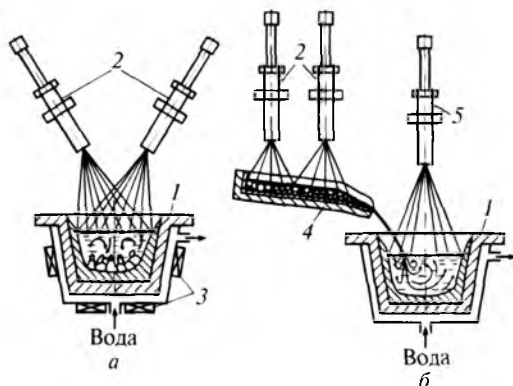


Рис. 7.8. Схемы гарнисажной плавки с применением независимых источников теплоты:
а — плавление шихты в тигле;
б — плавление шихты на лотке со сливом расплава в тигель

Вариант 1 (рис. 7.8, а). В гарнисажный тигель закладывается кусковая шихта, которая нагревается и расплавляется тепловой энергией, выделяемой электронной пушкой или плазмотроном 2. По мере расплавления шихты объем жидкого металла в ванне увеличивается. Перемешивание жидкого металла в тигле осуществляется электромагнитными полями, создаваемыми индукционными катушками 3. Проведение плавки титановых сплавов в гарнисажном тигле по этому варианту эффективно при наплавлении до 100 кг жидкого металла с перегревом сплава на 150–160 °С. При этом упрощается конструкция плавильной печи и снижается расход электрической энергии.

Вариант 2 (рис. 7.8, б). Кусковую шихту плавят электронным лучом или плазмой на лотке 4, выполненном из титана или другого металла, но с защитой его гарнисажем. В процессе плавки жидкий металл непрерывно стекает с лотка в гарнисажный тигель 1.

Чтобы исключить охлаждение металла и его затвердевание в тигле, зеркало ванны с жидким металлом нагревается дополнительным независимым источником теплоты 5. Плавку по этому варианту применяют для получения жидкого металла массой более 100 кг с перегревом выше температуры плавления на 150–200 °С. При этом 30–50 % шихты загружают в тигель. Скорость плавления металла на лотке должна быть не менее 10–15 кг/мин.

В обоих вариантах следует применять медные тигли, чтобы исключить загрязнение жидкого металла вредными примесями.

7.4. Шихтовые материалы для плавки титановых сплавов

В качестве шихтовых материалов для плавки используют:

цилиндрические слитки определенного химического состава диаметром 200–500 мм и длиной до 1500 мм. Слитки поступают в литейные цеха и участки с металлургических предприятий; литейные отходы, образующиеся при производстве фасонных отливок.

Поставляемые в фасонно-литейные цеха слитки первого перепада применяют в качестве расходного электрода. По химическому составу металл слитка соответствует той марке литейного сплава, из которого изготавливаются фасонные отливки. На металлургических предприятиях слитки первого перепада тщательно очищаются от возгонов и других посторонних примесей и подвергаются механической обработке для снятия загрязненного поверхностного слоя.

В балансе металла при производстве фасонных отливок доля литейных отходов составляет примерно 60 %, среди которых выделяют:

сортовые (кондиционные) — центральные стояки, прибыли, бракованные отливки, элементы литниковой системы; несортные — стружка от механической обработки, гарнисаж графитовых плавильных тиглей, сплески и др., которые составляют примерно 15–20 % общего количества отходов и повторно не вовлекаются в плавку, так как они сильно загрязнены примесями (углерод, кислород, азот, водород и др.).

Толщина поверхностного кондиционных отходов слоя составляет около 1,0 мм и содержит значительное количество вредных примесей, которые попадают в металл в результате химического взаимодействия металла с материалом литейной формы в период формирования отливки. Для вовлечения кондиционных отходов в переплавку их измельчают ацетилено-кислородной или анодно-механической резкой. В процессе резки металл нагревается до высоких температур и дополнительно насыщается вредными примесями. Толщина поверхностного газонасыщенного слоя при этом увеличивается до 1,2–1,5 мм. Подобные кусковые литейные отходы не вовлекают в повторный переплав из-за повышенного содержания примесей. Отходы подвергают механической очистке в галтовочных барабанах, на дробеструйных и дробеметных установках и химическому травлению.

Механической обработкой с открытых поверхностей отходов удаляются остатки материала литейной формы, шлаки и оксиды, образующиеся при газовой резке, пригар, но не удаляются газонасыщенный поверхностный слой отходов, пригар, находящийся в поднутренных и глубоких карманах.

После механической очистки литейные кусковые отходы подвергают химическому травлению с целью удаления поверхностного слоя металла, насыщенного вредными примесями.

Перед травлением отходы помещают на 0,5–2,0 ч в растворы щелочного состава, содержащие NaOH , NaNO_3 и NaNO_2 , с целью разрыхления окисленных поверхностных слоев. Температура раствора 130–145 °С. После этой обработки отходы промывают в теплой и холодной воде. Химическое травление осуществляют в кислотном растворе следующего состава: 60–70 мл/л H_2SO_4 (плотность 1,84 г/см³) и 60–140 мл/л HF (плотность 1,13 г/см³). Температура раствора 20–25 °С. Скорость травления 0,2–0,5 мм/ч. После химического травления очищенные отходы промывают в холодной воде, сушат при 100–150 °С. Затем их загружают в тару с плотно закрывающимися крышками и направляют на шихтовый двор.

Введение кусковых отходов в плавку производится двумя основными способами:

- ◇ путем загрузки отходов в гарнисажный тигель перед проведением плавки. Это наиболее простой и экономичный способ вовлечения отходов в плавку. Количество загружаемых отходов не должно

превышать 30–35 % массы плавки. При плавке металла с отходами несколько изменяются режимы плавки и требуется увеличение мощности электрической дуги. Расходуемые электроды из кусковых отходов изготовляют либо сваркой в инертной газовой среде, либо заливкой отходов, уложенных в стальную изложницу, расплавом той же марки сплава;

путем изготовления из кусковых отходов расходуемого электрода, когда в изложницу, имеющую рабочую полость диаметром 200–500 мм, укладывают кусковые отходы и ее помещают в камеру плавления-заливочной установки. Расплавляют стандартный расходуемый электрод и жидкий металл из гарнисажного тигля сливают в изложницу. После охлаждения металла из изложницы извлекают слиток, который используют в качестве расходуемого электрода.

Несмотря на механическую и химическую обработку, литейные титановые отходы содержат повышенное количество углерода, кислорода, азота и других элементов, которые оказывают отрицательное влияние на механические свойства металла. Повторное вовлечение металла с повышенным содержанием вредных элементов неизбежно приводит к росту их концентрации в выплавляемом сплаве.

При совместной плавке отходов и расходуемого электрода содержание примесей (C, N, O) в жидком металле не должно превышать допустимых концентраций. Исходя из этого положения, возможны различные варианты проведения плавки с использованием отходов. Например, если в литейных отходах концентрация примесных элементов несколько превышает норму, то такие отходы в виде кусков загружают в плавильный тигель (до 35 % общей массы выплавляемого металла), а расходуемый электрод в этом случае должен иметь низкую концентрацию этих элементов.

7.5. Технологический процесс плавки

Технологический процесс плавки в плавно-заливочных установках средней производительности может быть разделен на следующие основные четыре этапа: подготовка установки к плавке, приварка расходуемого электрода, вакуумирова-

ние плавильно-заливочной установки, плавление и разливка титанового сплава.

1. *Подготовка установки к работе.* Перед каждой новой плавкой внутреннюю поверхность печи очищают от возгонов предыдущей плавки с помощью пылесоса. С целью обезжиривания и удаления влаги внутренние части печи и резиновые уплотнения тщательно протирают чистыми салфетками, смоченными этиловым спиртом. Затем на центробежном столе устанавливают и закрепляют предварительно собранный контейнер с литейными формами.
2. *Приварка расходного электрода* осуществляется в следующем порядке: 1) устанавливают в тигель строго вертикально расходный электрод для его приварки к электрододержателю или огарку расходного электрода, оставшегося от предыдущей плавки; 2) подводят к установленному в тигель электроду до соприкосновения огарок, закрепленный в электрододержателе; 3) герметизируют плавильно-заливочную установку и вакуумируют камеру; 4) подают воду на все охлаждаемые части плавильно-заливочной установки; 5) поднимают электрод на 10–15 мм и включают источник электропитания; 6) медленно приближают огарок к верхнему торцу расходного электрода до возникновения дугового разряда; 7) растягивают электрическую дугу до 15–20 мм и увеличивают силу тока до 4000 А для электрода диаметром 180 мм и до 9000 А для электрода диаметром 440 мм; 8) выключают электропитание после образования на верхнем торце электрода жидкой ванны диаметром $\frac{3}{4}$ диаметра электрода и быстро прижимают огарок к жидкой ванне, жидкий металл затвердевает и надежно сваривает огарок с электродом; 9) после приварки электрода его охлаждают в камере при работающих вакуумных насосах. Время охлаждения зависит от диаметра электрода. Например, электрод диаметром 180 мм охлаждают не менее 20 мин, а электрод диаметром 440 мм — не менее 60 мин; 10) отключают вакуумные насосы после охлаждения электрода, установку разгерметизируют и проверяют качество приварки электрода.
3. *Вакуумирование плавильно-заливочной установки.* Убедившись в качественной приварке расходного электрода, приступают к вакуумированию плавильно-заливочной камеры. После герметизации установки включают вакуумные насосы и откачивают воздух до давления 0,13–0,67 Па. Продолжительность откачки обычно составляет 30–40 мин. Перед началом плавки проверяют гер-

метичность установки с помощью контрольной операции, называемой натеканием. Для этого вакуумным затвором отсекают рабочее пространство печи от вакуумной системы и замеряют давление в плавильной камере. Плавильно-заливочную установку в таком положении выдерживают обычно 5 мин и снова замеряют остаточное давление в камере установки. Рассчитывают натекание:

$$E = V \frac{P_1 - P_2}{\tau},$$

где E — натекание, л·Па/с; V — объем плавильной камеры, л; P_1 — давление, до которого была откачана плавильная камера установки, Па; P_2 — давление, установившееся в плавильной камере по истечении времени τ , Па.

Натекание не должно превышать значения, указанного в техническом паспорте плавильно-заливочной установки. Натекание в основном свидетельствует о некачественной сборке установки (плохое обжатие вакуумных уплотнений), некачественной подготовке литейных форм к заливке (режим обжига, длительность пребывания форм в атмосфере воздуха после обжига и т.д.).

Если в результате проверки натекания выясняется, что оно соответствует допустимому, снова откачивают плавильную камеру до давления 0,13–0,67 Па и приступают к плавке металла.

Плавление расходного электрода и разливка титанового сплава производится в следующем порядке: 1) подают перед началом плавки воду на все водоохлаждаемые части плавильно-заливочной установки; 2) поднимают установленный в тигель электрод на высоту 20–30 мм от дна тигля и, включив электропитание установки, медленно его опускают до возникновения дугового разряда; 3) медленно поднимают электрод и увеличивают длину дуги до 50–60 мм и силу электрического тока до 6000 А при напряжении 28 В; 4) сохраняют этот режим до образования на дне тигля первой порции жидкого металла и только после этого увеличивают силу тока до 7000 А; 5) повышают ток до 8000 А и через определенные периоды времени, зависящие от массы наплавляемого металла, продолжают последовательно увеличивать силу тока на дуге до 12 000 А, поддерживая напряжение в пределах 30–40 В; 6) производят слив расплава в литейные формы после наплавления необходимой массы металла. Технология слива металла зависит от

способа разливки, определяемого конструкцией установки; *ба*) если слив металла осуществляется при отключенной дуге, то после наплавления требуемой массы металла отключают источник электропитания и с высокой скоростью поднимают электрододержатель с остатком расходуемого электрода (огарком) вверх, а тигель поворачивают в положение «слив», по окончании разливки тигель возвращают в исходное положение; *бб*) если конструкцией установки предусмотрен слив металла без отключения электропитания (слив при горячей дуге), то после наплавления металла электрод поднимают на 200–300 мм над уровнем жидкого металла, а силу тока на электрической дуге устанавливают в пределах 6000–7000 А и наклоняют тигель для слива металла, по окончании заливки отключают источник электропитания, а тигель возвращают в исходное положение; *бв*) при центробежной заливке форм за 2–4 мин до окончания плавки включают центробежную машину и доводят число оборотов контейнера до заданного. После заливки форм расплавом через 1–2 мин центробежную машину отключают. Залитые литейные формы оставляют в камере плавно-заливочной установки на 1,5–2,0 ч в вакууме. В течение этого времени отливки охлаждаются до 300–350 °С. Затем установку разгерметизируют и извлекают контейнер с литейными формами.

Общая длительность рабочего цикла плавки и литья титановых сплавов в плавно-заливочных установках средней производительности (833Д, ВДЛ-4, «Нева-2» и др.) складывается из длительности отдельных этапов.

Время, затрачиваемое на подготовку установки к плавке, зависит от ее конструкции и степени механизации и в среднем составляет 30–40 мин. Примерно 50–70 мин затрачивается на приварку расходуемого электрода к огарку, закрепленному на электрододержателе, причем половина этого времени уходит на вакуумирование камеры, а вторая половина – на охлаждение электрода после его прижарки до 300–350 °С.

Продолжительность вакуумирования плавно-заливочной установки до рабочего давления 0,13–0,67 Па составляет около 40 мин. Длительность этапа плавления металла расходуемого электрода зависит от вместимости тигля по жидкому титану и скорости плавления расходуемого электрода, которая обычно состав-

ляет 5–15 кг/мин. Так, в установке «Нева-2» 150 кг титанового сплава расплавляется за 35 мин.

Охлаждение отливок в вакуумной камере плавильно-заливочной установки до температуры 300–350 °С происходит за 90–120 мин. Это время можно сократить в 1,5 раза, если после заливки литейных форм камеру установки заполнить аргоном или гелием.

Таким образом, общая длительность рабочего цикла плавки и литья титановых сплавов достигает 4–5 ч.

В рабочем цикле рассматриваемых установок названные этапы технологического процесса выполняются последовательно, без их перекрытия, что приводит к большой длительности технологического процесса плавки и в конечном счете к низкой их производительности, оцениваемой массой металла, выплавленной за 1 ч.

В плавильно-заливочных установках типов ДВЛ-250, ДВЛ-160М и др. установлены плавильные тигли повышенной вместимости, а конструкция установок позволяет проводить отдельные технологические операции не последовательно, а параллельно (см. описание конструкции этих установок), что существенно снижает общую длительность рабочего цикла плавки и увеличивает их производительность. Например, длительность рабочего цикла установки ДВЛ-160М в 2,5 раза меньше, чем в установке 833Д, за счет перекрытия проведения ряда технологических операций, а производительность установки при этом выше в 7 раз.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем сущность гарнисажной плавки титановых сплавов? Перечислите достоинства и недостатки этого способа плавки.
2. Назовите основные узлы плавильно-заливочных установок для изготовления отливок из титановых сплавов.
3. Конструкции плавильно-заливочных установок по способу разлива металла из тигля в формы разделяются на две группы. Назовите эти группы, их достоинства и недостатки.
4. Составьте схему и опишите технологический процесс плавки титановых сплавов в гарнисажном тигле плавильно-заливочной установки.
5. Почему плавка и литье отливок из титановых сплавов в плавильно-заливочных установках практически полностью исключает насыщение металла вредными примесями?
6. Почему литейные титановые отходы без специальной предварительной обработки не вовлекаются в повторную плавку?

7. Составьте схему технологического процесса плавки и литья отливок в современных плавильно-заливочных установках.
8. Производительность плавильно-заливочной установки ДВЛ-160М в 7 раз превосходит аналогичный показатель установки 833Д. За счет каких конструктивных усовершенствований достигнут такой результат?

ГЛАВА 8 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

8.1. Исходные формовочные материалы

Чрезвычайно высокая химическая активность титановых сплавов в жидком состоянии, а также высокая температура плавления и литья титана предъявляют особые требования к свойствам литейных форм.

Для получения отливок из титановых сплавов используются литейные формы из высокоогнеупорных и наиболее химически инертных по отношению к титану формовочных материалов.

Наибольшее распространение получили:
неразъемные оболочковые литейные формы, изготовленные по выплавляемым моделям;
прессованные и набивные литейные формы, изготовленные по металлическим или деревянным моделям в опоках и стержневых ящиках;
разъемные оболочковые формы, изготовленные по нагреваемым металлическим моделям.

Методы литья титановых сплавов в металлические формы (литье в кокиль и под давлением) находят ограниченное применение.

Литейные формы должны обладать химической стойкостью по отношению к расплавленному титану и высокой огнеупорностью, а также удовлетворять требованиям, предъявляемым вообще к литейным формам: минимальным изменением размеров в процессе обжига форм; необходимой механической прочностью; кроме того, они должны отвечать требованиям технологии приготовления формовочной и стержневой смесей, технологии изготовления форм и стержней, условиям выбивки форм и стержней и т.д.

Для титанового литья наибольшее распространение получили формовочные смеси, в качестве огнеупорной основы которых используют материалы:

- ♦ углеродные — графит, кокс, пироуглерод и др.;
- ♦ керамические — огнеупорные оксиды, а также карбиды, нитриды и бориды.

Наиболее высокой химической стойкостью по отношению к титану обладают формы на основе углеродных материалов. Они нашли широкое применение как в отечественной, так и в зарубежной практике. Однако недостаточно хорошие санитарно-гигиенические условия работы с углеродными материалами, дефицитность, а также некоторые другие недостатки заставляют искать возможности расширения использования других огнеупорных материалов.

В качестве связующего для изготовления углеродных форм в основном применяют органические материалы (синтетические смолы), которые в процессе обжига форм образуют прочное углеродистое образование, связывающее зерна огнеупорной основы.

Для обеспечения необходимой пластичности и прочности в «сыром» состоянии в формовочные смеси вводят вспомогательные материалы — декстрин, патоку и т.д.

Из углеродных формовочных смесей изготавливают набивные, прессованные формы, разъемные оболочковые формы и формы, получаемые по выплавляемым моделям.

В качестве огнеупорной основы для изготовления керамических форм используют высокоогнеупорные оксиды — альфа-оксид алюминия (электрокорунд), оксид магния и диоксид циркония. Имеются сведения об использовании в качестве огнеупорной основы других высокоогнеупорных материалов — оксида кальция, оксида бериллия, карбидов, нитридов и др.

Из огнеупорных оксидов изготавливают в основном формы, получаемые по выплавляемым моделям, а также набивкой и прессованием.

Для изготовления керамических форм применяют связующие двух типов:

- ♦ растворы на силикатной основе — гидролизированный этилсиликат и жидкое стекло;
- ♦ растворы химических веществ, которые в процессе обжига превращаются в оксиды, однотипные с огнеупорной основой формовочной смеси.

В формовочные смеси вводятся также вспомогательные материалы, которые улучшают свойства смесей и форм.

С целью повышения инертности керамических форм на их рабочую поверхность иногда наносят огнеупорные химически стойкие по отношению к титану покрытия, состоящие из вольфрама, молибдена, графита, пироуглерода, гидрида титана и других материалов.

Искусственный графит — основной углеродосодержащий материал, широко применяемый как в нашей стране, так и за рубежом для изготовления литейных форм. Помимо графита используют также кокс.

Свойства искусственного графита определяются его структурой, которая в свою очередь зависит от свойств исходного сырья и режима технологического процесса изготовления.

Основным сырьем для получения искусственного графита служат продукты нефтяной и каменноугольной промышленности — пиролизные и крекинговые нефтяные коксы, антрациты и термоантрациты, пековые коксы. Исходные материалы различаются содержанием углерода, примесей и физико-химическими свойствами, что в конечном итоге сказывается на свойствах получаемых графитов.

Для графита характерны две идеализированные кристаллические структуры — гексагональная и ромбоэдрическая. Атомы углерода в структурах расположены слоями. В слоях они находятся в вершинах правильных шестиугольников.

Графит с ромбоэдрической структурой менее устойчив, чем с гексагональной. Установлено, что в графитах процентное содержание графита с ромбоэдрической структурой невелико (до 10–15 %) и не является постоянным, а зависит от исходного сырья и технологии.

Предел прочности при растяжении большинства марок графитов с ростом температуры до 2600 °С возрастает в 1,5–2,5 раза. При дальнейшем нагреве графита до 3000–3200 °С прочность графита резко падает до прочности графита при комнатной температуре.

Ввиду высокой химической активности титана важное значение приобретает такая характеристика материала, используемого для изготовления литейной формы, как газотворность. Выделяющиеся из формы в период формирования отливок газы растворяются в металле и резко ухудшают свойства отливки.

Графиты, обладая развитой макро- и микропористостью, сорбируют из атмосферы значительное количество газов. При нагреве форм от теплоты отливки газы десорбируют из формы и вступают в химическое взаимодействие с титаном. Кроме того, из формы при ее нагреве выделяются газы, образующиеся в результате термодеструкции связующего вещества.

Поэтому графитовые литейные формы при неправильном ведении технологического процесса их изготовления и подготовки форм к заливке могут обладать значительной газотворностью. Газосодержание промышленных литейных графитовых форм, прошедших обжиг в восстановительной атмосфере, достаточно высокое. Это обстоятельство значительно снижает химическую инертность форм из углеродных материалов и ухудшает качество отливок.

В окислительных средах графиты стойки лишь при относительно низких температурах. Реакция с кислородом воздуха начинается при 400 °С, а с диоксидом углерода – при температуре 500 °С. С повышением температуры скорость окисления возрастает и при 1200–1300 °С наблюдается максимальная скорость окисления.

Теплопроводность графитов соизмерима с теплопроводностью металлов и значительно выше, чем у огнеупорных оксидов, используемых для изготовления литейных форм.

Для анализа тепловых условий формирования отливок используют коэффициенты теплоаккумулирующей способности и температуропроводности. В табл. 8.1 даны значения указанных коэффициентов для графита (средние значения) и ряда других материалов (для сравнения), используемых для изготовления литейных форм.

Графиты обладают низким коэффициентом термического расширения, что способствует получению точных отливок и уменьшает вероятность образования в них трещин.

Таблица 8.1. Теплофизические свойства графита в сравнении с другими материалами

Материал	Коэффициент теплоаккумуляции, кВт·с/м ² К	Коэффициент температуропроводности · 10 ⁴ , м ² /с
Графит	10,0	0,172
Алюминий	22,9	0,85
Сталь	14,5	0,139

Окончание табл. 8.1

Материал	Коэффициент теплоаккумуляции, кВт с/м ² К	Коэффициент температуропроводности · 10 ⁴ , м ² /с
Чугун	14.5	0.139
Сухая песчано-глинистая смесь	1.395	0.0006

При освоении титанового литья для изготовления литейных форм были опробованы различные огнеупорные оксиды — диоксид кремния, оксид циркония, оксид алюминия, диоксид циркония, оксид магния, оксид бериллия, оксид кальция, диоксид тория и др. Из всех опробованных высокоогнеупорных оксидов наиболее приемлемыми материалами для изготовления форм оказались альфа-оксид алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (электрокорунд), оксид магния, диоксид циркония.

Электрокорунд — широко используемый для изготовления форм, получаемых по выплавляемым моделям, материал, характеризующийся высокой механической прочностью, устойчивостью в сильно восстановительной атмосфере вплоть до 1700 °С, а в окислительных условиях может использоваться до 1890 °С. Имеет плавное термическое расширение: 2 % при нагревании от 20 до 2000 °С. Формы и стержни из электрокорунда обладают хорошей термостойкостью. Электрокорунд подразделяют на нормальный (черный) и белый. Химический состав корунда представлен в табл. 8.2. Примеси, содержащиеся в электрокорунде, снижают его температуру плавления и химическую стойкость.

Таблица 8.2. Химический состав корунда в процентах

Наименование и обозначение корунда	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	*SiO ₂	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O
Нормальный ЭН	93,50–96,08	0,7–1,68	0,64–1,68	1,7–2,71	0,58–0,74	0,10–0,28	—
Белый ЭБ	98,5–99,5	0,07–0,14	0,2–0,6	—	0,03–0,2	—	0,2–0,6

У альфа-оксида алюминия гексагональная кристаллическая решетка, поэтому его свойства зависят от кристаллографического

направления, а в реальном поликристаллическом материале представляют собой результат усреднения свойств в двух главных кристаллографических направлениях.

Оксид магния MgO получают обжигом при $1500\text{--}1600\text{ }^\circ\text{C}$ магнезита MgCO_3 . Высокая упругость паров оксида магния при температурах $1500\text{--}1700\text{ }^\circ\text{C}$ не позволяет использовать его для изготовления форм, заливаемых в вакууме в горячем состоянии.

Диоксид циркония ZrO_2 из всех известных оксидов обладает самой низкой теплопроводностью. Термическая устойчивость изделий из оксида циркония выше, чем изделий из оксида алюминия и оксида магния. Термодинамически диоксид циркония достаточно устойчив по отношению к титану. Однако его использование ограничивает высокая стоимость. Поэтому ZrO_2 целесообразно применять только для лицевых слоев формы, изготавливая последние слои из более дешевых огнеупорных материалов, например корунда.

Интенсивность химического взаимодействия огнеупорных оксидов с титаном может быть принципиально оценена по изменению изобарно-изотермического потенциала огнеупорных оксидов и оксидов титана.

Прочность низшего оксида титана TiO превосходит химическую прочность высокоогнеупорных оксидов Al_2O_3 , ZrO_2 и MgO при температуре плавления титана. Следовательно, титан способен восстанавливать все указанные оксиды. Наиболее активно титан взаимодействует с диоксидом кремния. В табл. 8.3 представлены основные свойства высокоогнеупорных оксидов.

Таблица 8.3. Некоторые свойства огнеупорных оксидов

Свойство	Al_2O_3	ZrO_2	MgO
Тип кристаллической решетки	Гексагональная $a = 0,512\text{ нм}$	Кубическая $a = 0,508\text{ нм}$	Кубическая $a = 0,420\text{ нм}$
Температура плавления, $^\circ\text{C}$	2050	2690	2800
Плотность, кг/м^3	4000	5730	3570
Коэффициент термического расширения $K_T \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	8,6	7,2	13,5
Упругость пара оксида при $1727\text{ }^\circ\text{C}$, Па	0,577	1,01	39,5

Окончание табл. 8.3

Свойство	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	MgO
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), при <i>t</i> , °С:			
100	30,27	1,95	34,46
600	9,127	2,09	11,01
1200	5,53	2,39	5,86
1600	6,07	—	0,57
Теплоемкость, Дж/(кг·К), при <i>t</i> , °С			
37	880	992	502
704	1210	1300	670
1204	1300	—	—

Связующие вещества для углеродных и керамических форм состоят из собственно связующего и добавок, изменяющих свойства связующего вещества в требуемом направлении, например добавки ускоряют отверждение связующего, изменяют его вязкость и т.д.

Учитывая чрезвычайно высокую реакционную способность титановых сплавов в жидком состоянии, высокую температуру литья 1800–2000 °С и низкое давление в период формирования и охлаждения отливки, к связующим веществам предъявляют жесткие требования.

Во-первых, связующее должно образовывать после тепловой обработки изготовленных литейных форм огнеупорное, химически инертное и стойкое по отношению к жидкому титану вещество.

Во-вторых, связующее должно удовлетворять требованиям, обычно предъявляемым к таким веществам, а именно: обеспечивать необходимые технологические свойства формовочной смеси — текучесть, прочность в необработанном состоянии и др.;

способствовать получению литейных форм и стержней с заданными свойствами — газопроницаемостью, газотворностью, прочностью и т.д.;

- ◇ не претерпевать в процессе тепловой обработки значительных объемных изменений, чтобы литейные формы и стержни имели стабильные литейные размеры;
- ◇ соответствовать технико-экономическим показателям производства, санитарно-гигиеническим нормам и т.п.

Связующие вещества, применяемые в формовочных смесях для литья титановых отливок, разделяют на два класса — органические, используемые для изготовления углеродных форм; и неорганические — для изготовления керамических форм.

Для углеродных форм применяют органические материалы, которые, обладая достаточно высокой когезионной и адгезионной прочностью, способны в процессе тепловой обработки обеспечивать прочную связку между зёрнами наполнителя за счет образования при карбонизации (коксовании) прочного углеродного продукта (полукокса, кокса, графита). Такими свойствами обладают синтетические смолы, которые при переработке в результате отверждения превращаются в неплавкие и нерастворимые полимеры трехмерной структуры (олигомеры). К синтетическим относятся алкидные смолы, фенолоальдегидные, мочевиноформальдегидные, меламиноформальдегидные, фурановые и др. Широкое применение в литейном производстве получили фенолоальдегидные, фурановые и фенолфурфурольные смолы.

К неорганическим связующим относятся: жидкое стекло (щелочные силикаты), гидролизованный этилсиликат и растворы химических веществ, которые в процессе обжига превращаются в оксиды, однотипные с огнеупорной основой формовочной смеси (оксинитраты, фосфаты и др.).

Жидкое стекло как связующее используется для изготовления форм и стержней, получаемых уплотнением и по выплавляемым моделям. Жидкие стекла относятся к системе щелочных силикатов, из которых наибольшее распространение нашли натриевые силикаты. Состав натриевого стекла характеризуется модулем:

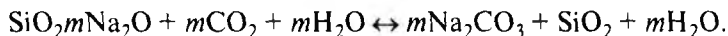
$$m = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Na}_2\text{O}} \frac{M_{\text{SiO}_2}}{M_{\text{Na}_2\text{O}}} = \frac{\% \text{SiO}_2}{\% \text{Na}_2\text{O}} 1,032,$$

где M — молекулярная масса SiO_2 и Na_2O .

Плотность натриевого стекла равна 1470–1520 кг/м³; $m = 2,6$ – $2,8$, т.е. натриевое стекло содержит избыток кремнезема по отношению к оксиду натрия.

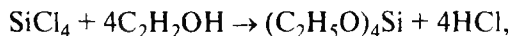
Силикат натрия — малоустойчивое вещество, разлагающееся под действием кислот с выделением высокодиспергированного кремнезема.

При изготовлении литейных форм и стержней для отверждения используют углекислоту:



Частицы кремнезема, имеющие положительный заряд, и силикатные ионы (отрицательный заряд) соединяются в мицеллы. Под действием сил Ван-дер-Ваальса мицеллы кремнезема коагулируют в крупные коллоидные частицы, которые образуют гель кремневой кислоты. Пленка геля, располагающаяся вокруг зерен огнеупорного наполнителя, придает форме необходимую прочность.

Наибольшее распространение в качестве связующего для изготовления оболочковых форм по выплавляемым моделям находят растворы этилсиликата — продукта реакции этилового спирта с четыреххлористым кремнием, который получают при непрерывном их смешивании и охлаждении в реакторе:



где $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$ — эфир ортокремниевой кислоты.

В реальных условиях помимо $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$ образуются также эфиры других кремниевых кислот, например $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_6\text{SiO}_2$; $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_8\text{Si}_3\text{O}_2$ и др., смесь которых называется этилсиликатом.

Выпускаемые химической промышленностью этилсиликаты имеют сложный состав, условно характеризуемый содержанием кремния; так, для литейного производства производят этилсиликаты ЭТС-32, ЭТА-40 и ЭТС-50, где цифры означают среднее условное содержание SiO_2 в весовых процентах.

Связующее вещество получают путем гидролиза этилсиликата в растворе воды в спирте или ацетоне. При гидролизе этоксильные группы $\text{C}_2\text{H}_5\text{O}$ замещаются гидроксильными OH . Так как этилсиликат и вода не растворяются друг в друге, гидролиз ведут в присутствии органических растворителей — этилового спирта, ацетона и др. Продукты гидролиза (кремниевые кислоты) хорошо растворяются в этих жидкостях, образуя стойкие органозоли.

Необходимое количество растворителя для гидролиза вводят в зависимости от требуемого количества SiO_2 в связующем раство-

ре, которое определяется номенклатурой отливок и применяемыми формовочными материалами. Обычно количество SiO_2 в связующем растворе колеблется в пределах 7,5–18 %.

Одновременно с процессом гидролиза эфиров в растворе происходит процесс конденсации. Продукты гидролиза и конденсации растворяются в жидкости.

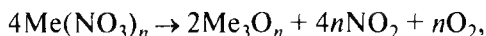
Растворители (спирт, ацетон и др.) вводят в количестве 10–20 % в зависимости от содержания SiO_2 в связующем растворе. Для ускорения реакции гидролиза применяют катализатор – соляную кислоту. Содержание HCl в растворе составляет 0,2–0,3 %.

Реакцию гидролиза осуществляют следующим образом: вливают в предварительно приготовленную смесь растворителя, воды и соляной кислоты этилсиликат и перемешивают. Реакция гидролиза протекает с повышением температуры раствора до 40–45 °С. После достижения максимальной температуры перемешивание прекращается.

Материал литейных форм, которые применяются для литья отливок из титановых сплавов, изготовленных с использованием этилсиликатного связующего, неоднороден по химическому составу. После полного цикла подготовки к заливке (сушка, обжиг) форма состоит из зерен высокоогнеупорного и достаточно химически стойкого по отношению к титану оксида (ZrO_2 и др.) и связующего вещества из оксида кремния. Наличие SiO_2 в составе материала литейной формы резко снижает его химическую стойкость. В результате взаимодействия титана с SiO_2 металл отливки, особенно ее поверхностные слои, обогащаются кислородом и кремнием.

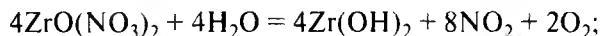
Поэтому для фасонного литья титановых сплавов весьма перспективным является использование в качестве связующего вещества материалов, которые после сушки и обжига позволяют получить литейную форму, однородную по химическому составу. К таким материалам относятся растворы азотнокислых солей, которые после полного цикла изготовления керамической формы превращаются в оксид, соответствующий по химическому составу оксиду, являющемуся огнеупорной основой формовочной смеси.

В результате термического разложения азотнокислых солей образуются высокодисперсные аморфные оксиды, которые обладают свойствами связующего материала:



где n — валентность металла. Например, для изготовления оболочковых форм по выплавляемым моделям в качестве огнеупорного наполнителя используют диоксид циркония ZrO_2 . Используя в качестве связующего вещества основную соль азотнокислого циркония $ZrO(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$, после сушки и обжига получают форму, состоящую из диоксида циркония.

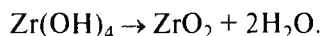
Формы с азотнокислыми солями твердеют либо в процессе нагрева, либо в атмосфере аммиака при нормальной температуре. В обоих случаях отверждение форм происходит вследствие образования гидроксида металла по реакциям при нагреве:



в атмосфере аммиака:



В процессе обжига изготовленных литейных форм (до $1000^\circ C$) гидроксид циркония разлагается с образованием оксида:



В результате вся литейная форма по своему химическому составу становится однородной.

8.2. Изготовление литейных форм по выплавляемым моделям

Для изготовления сложных по конфигурации и тонкостенных отливок наиболее распространено литье из титановых сплавов в формы, получаемые по выплавляемым моделям. Метод позволяет максимально приблизить заготовку к готовой детали, а в ряде случаев получить литую деталь, не требующую дополнительной обработки, вследствие чего резко снижаются трудоемкость и стоимость изготовления деталей из титановых сплавов.

Технологический процесс изготовления форм по выплавляемым моделям для титанового литья в основном подобен процессу изготовления форм для стального литья. Последовательность современного промышленного варианта процесса получения отливок

методом литья по выплавляемым моделям рассмотрим на примере изготовления отливки, которая представлена на рис. 8.1, а (поз. 1).

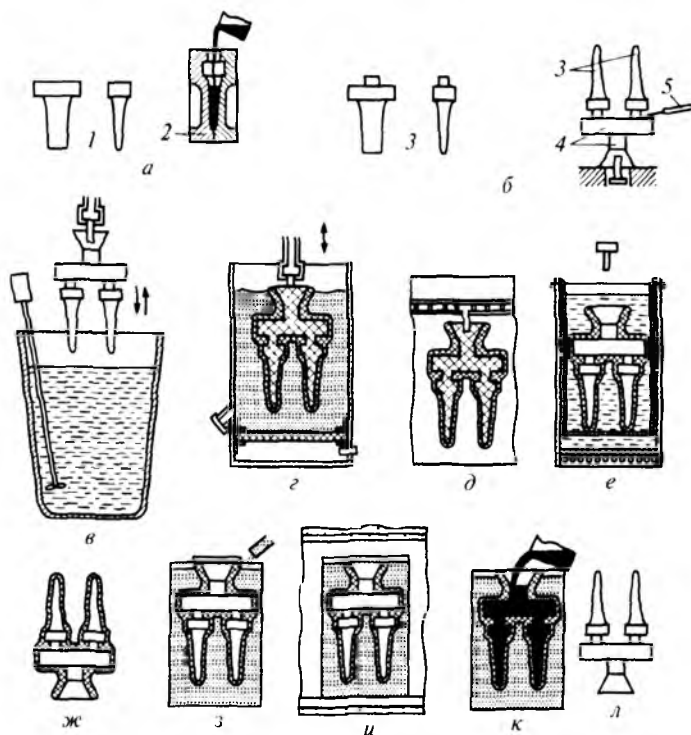


Рис. 8.1. Схема процесса изготовления отливок по выплавляемым моделям

1. В специальной металлической пресс-форме (2 на рис. 8.1, а) изготавливаются модели будущих отливок. Точность размеров и качество поверхности рабочей полости пресс-формы должны не менее чем на один класс (кавалитет) превышать эти же характеристики получаемой отливки. Модели выполняются путем заливки расплавленного модельного состава или запрессовкой его в пастообразном состоянии в пресс-форму. В зависимости от размеров получаемых моделей, а также масштабов производства их изготавливают в одноместных или многомestных пресс-формах обычно заодно с некоторыми элементами литниково-питающих систем.
2. Модели деталей (3 на рис. 8.1, б) собирают в блок вместе с отдельно изготовленными элементами литниковой системы, выполнен-

ными также из модельного состава. В зависимости от размеров модели в блок собирается от одной до нескольких десятков моделей. Сборка производится припайванием, механическим соединением или приклеиванием. На рис. 8.1, б представлен блок из двух моделей. Паяльником 5 приваривают модель отливки 3 к элементу литниковой системы 4.

3. На модельные блоки (рис. 8.1, в) последовательно наносится несколько слоев специальной суспензии, состоящей из жидкого связующего и порошков огнеупорного материала — кварца, корунда, циркония, графита, кокса и др. Каждый слой суспензии присыпается порошком огнеупорного материала. На рис. 8.1, г представлена схема нанесения огнеупорного материала путем опускания блока моделей в псевдокипящий слой сухого огнеупорного материала. Обсыпочный материал упрочняет слой суспензии и препятствует ее стеканию с модельного блока. После нанесения каждого слоя суспензии и слоя обсыпочного материала блок моделей направляется на сушку с целью отверждения связующего и повышения прочности оболочки (рис. 8.1, д).

Метод сушки оболочки выбирают в зависимости от природы связующего и условий производства: естественный в помещении цеха, в стационарных камерах с контролируемой атмосферой, вакуумно-аммиачную сушку и др.

Число наносимых слоев зависит от размеров и массы отливаемой детали, свойств литейного сплава и других факторов. Обычно число наносимых слоев составляет от 4 до 8, что соответствует толщине оболочки 5–10 мм. Для крупных отливок используют оболочки толщиной 15 мм и более.

4. Удаление модели после формирования оболочки производят различными способами с учетом свойств модельного состава. Например, легкоплавкие воскообразные модельные составы на основе парафина удаляют из оболочек в горячей воде или расплаве модельной массы (рис. 8.1, е). Модельная масса расплавляется и вытекает из оболочки, размещаясь на поверхности ванны.
5. После удаления модели оболочку просушивают на воздухе (рис. 8.1, ж).
6. Оболочковую форму устанавливают в металлическую опоку и засыпают опорный наполнитель (обычно кварцевый песок) (рис. 8.1, з).
7. Опоки с оболочковыми литейными формами направляют в нагревательные печи для обжига при температуре 800–1100 °С с целью

удаления остатков модельной массы, органических компонентов связующего вещества и упрочнения оболочки спеканием (рис. 8.1, *и*).

8. Заливка литейной оболочковой формы (рис. 8.1, *к*) производится непосредственно после обжига, когда ее температура достаточно высока, что позволяет существенно улучшить заполняемость форм расплавом и изготавливать тонкостенные и сложные по конфигурации отливки.
9. После заливки форм и охлаждения отливок их выбивают из формы на решетках (рис. 8.1, *л*).

Для изготовления форм по выплавляемым моделям, предназначенных для титанового литья, широко используются такие огнеупорные материалы, как графит, электрокорунд, кокс.

Модельные составы для изготовления моделей применяются те же, что и для стального литья. В промышленности широко применяются несколько модельных составов: ПС-50-50, Р-2, Р-3, КПЦ, ВИАМ-102 и др. Составы и технологические свойства модельных составов представлены в табл. 8.4.

Таблица 8.4. Модельные составы и их свойства

Название модельного состава	Содержание компонентов (вес.%)								Свойства составов				Линейная усадка, %	Зональность, %
	Парафин	Церезин	Стеарин	Буроугольный воск	Торфяной воск	Канифоль	Карболоид	Полистироль	Температура плавления, °С	Температура пастообразного состояния, °С	Предел прочности, МПа			
											изгиб	растяжение		
ПС-50-50	50	—	50	—	—	—	—	—	47,5	43	2,0	1,0	0,8	0,05
Р-3	58	25	—	12	—	—	—	—	79	58	2,7	1,3	1,05	0,1
КПсЦ 50-30-20	—	20	—	—	—	50	—	30	140	—	7,7	3,8	1,0	0,03
ВИАМ-102	20	—	—	50	25	—	—	—	80	53	3,8	—	0,9	0,25
Кб Бк 98	—	—	—	—	—	—	98	—	120	—	4,0	—	—	—

Пастообразные модельные составы готовят в специальных установках с лопастным поршневым или шестеренчатым смесителями. Готовую массу подают в пресс-машину, где она запрессовывается в пресс-форму. Полученные восковые модели собирают в модельные блоки с литниковой системой и направляют для нанесения суспензии. Применяют три вида суспензий — на электрокорунде со связкой на основе гидролизованного этилсиликата, графитовую и коксовую, где в качестве связующего выступают фенолформальдегидные смолы, а в качестве катализатора — кислоты.

Электрокорундовые формы для литья титана используют ограниченно, так как жидкий титан взаимодействует с формой и на поверхности отливок образуется газонасыщенный слой. Для уменьшения загрязнения металла примесями содержание SiO_2 в суспензии не должно превышать 10–11 %. Использование суспензии, применяемой для изготовления форм стального литья и содержащей 18 % SiO_2 , приводит к значительному повышению содержания кислорода, кремния и других элементов в металле отливки.

Соотношение гидролизованного раствора этилсиликата и порошков электрокорунда составляет 400–450 см^3 на 1 кг порошков. Приготовленную керамическую суспензию, выдержав 2–3 ч до удаления пузырьков воздуха, наносят на восковую модель. В качестве присыпочно-го материала применяют порошок электрокорунда № 32, 40, 63 и 80.

Послойная сушка оболочки проводится на воздухе или в вакуумно-аммиачных камерах. После нанесения необходимого числа слоев модельную массу удаляют из формы, а форму подвергают тепловой обработке в печах с воздушной средой при температуре 970–1000 °С с выдержкой 2–3 ч.

Графитовые формы получили наибольшее распространение для литья титановых отливок, так как они лучше других противостоят взаимодействию с жидким титаном.

Суспензию для графитовых форм готовят на основе фенолформальдегидных смол или фенолборитовых, которые разводят спиртом до плотности 0,95–0,96 г/см^3 ; в указанный раствор вводятся порошки графита следующего состава (масс. %): сухого коллоидального графита 20–25 и графитовых порошков 75–80 марок ГМЗ, ЭК зернистостью 0,03–0,1 мм.

Огнеупорная суспензия на основе графита содержит следующие компоненты: 20–25 масс. % связующего (смола ВИАМ); 7–9 масс. % отвердителя (контакт Петрова); 30–36 масс. % растворителя – спирта этилового; остальное – наполнитель – графитовый порошок. Графитовые порошки перед применением просушивают при температуре 150–180 °С для удаления влаги.

Приготовление суспензии ведут в следующей последовательности: 1) тщательно перемешивают порошки со спирто-смоляным раствором, после чего в суспензию вводят отвердитель «контакт Петрова»; готовая суспензия должна иметь плотность 1,15–1,2 г/см³; причем плотность первых двух слоев должна составлять 1,18–1,2 г/см³, последующих – 1,15–1,17 г/см³; 2) наносятся графитовые порошки зернистостью 0,1–1,5 мм при создании оболочки на модель с суспензией. Для 1-, 2- и 3-го слоев используют порошки зернистостью 0,1–0,5 мм, для последующих – 0,6–1,5 мм; 3) выплавляют модельную массу; 4) подвергают оболочки тепловой обработке.

Обжиг графитовых форм ведется в две стадии (рис. 8.2). Первая стадия – предварительная – осуществляется при температуре 800–850 °С в печах с графитовым затвором или контейнерах. Графитовый затвор предотвращает попадание воздуха в зону форм и исключает окисление графитовой оболочки.

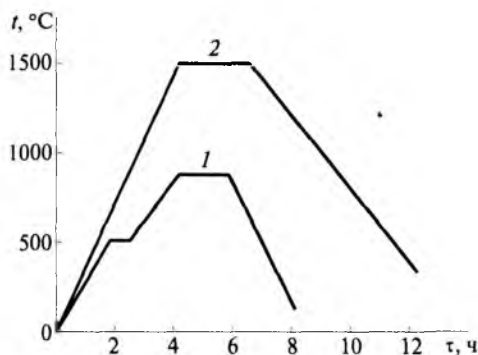


Рис. 8.2. Режимы обжига графитовых форм, изготовленных по выплавляемым моделям:

1 – обжиг в восстановительной атмосфере; 2 – обжиг в вакууме

Вторую стадию обжига ведут при 1600–1650 °С в вакуумных печах с индукционным нагревом. Графитовые формы, прошедшие высокотемпературную обработку, обеспечивают наилучшее качество поверхности отливок с глубиной газонасыщенного слоя

не более 0,05 мм. Эти формы широко применяются для литья тонкостенных ответственных деталей.

Кокс является одним из недефицитных материалов для изготовления форм по выплавляемым моделям. У него хорошие физико-механические свойства и сравнительно невысокая себестоимость. Кокс обладает рядом преимуществ по сравнению с графитом: хорошо поддается дроблению, полученный порошок имеет необходимую прочность и твердость и его стоимость в 2–3 раза ниже, чем у графита. Формы из кокса имеют более стабильную усадку и минимальный разброс, что обеспечивает высокую точность на литых деталях.

При производстве коксовых форм суспензию также готовят на основе порошка кокса.

Технология изготовления оболочковых коксовых форм по выплавляемым моделям аналогична технологии изготовления графитовых форм за исключением обжига. Высокотемпературный обжиг коксовых форм проводится при температуре 1300–1550 °С. Это обусловлено тем, что в связующем и материале обсыпки до температуры 1600 °С сохраняется структура кокса. При повышении температуры кокс начинает превращаться в графит, из-за чего в форме возникают дополнительные напряжения, приводящие к образованию микротрещин и снижению ее прочности.

Формы на основе кокса имеют низкую теплопроводность — $\lambda_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1,7 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, что способствует улучшению заполняемости тонкостенных каналов формы и уменьшению поверхностных дефектов — неспаев.

8.3. Изготовление уплотняемых и прессованных форм

Для изготовления литейных форм уплотнением (послойная набивка, прессование) в основном используют углеродные (графитовые) формовочные смеси, где в качестве огнеупорного материала применяют графитовый порошок заданного гранулометрического состава.

В качестве связующего в таких смесях применяют синтетические смолы, а также водорастворимые связующие вещества.

В отдельных случаях уплотняемые литейные формы для титанового литья изготавливают из формовочных смесей, в состав которых входят высокоогнеупорные оксиды.

Графитовые формовочные смеси с органическими связующими (синтетическими смолами) широко распространены в промышленности. Основное их достоинство — достаточно хорошие технологические свойства — прочность в сыром состоянии, текучесть, формруемость и т.д., а главное преимущество заключается в том, что формы из графитовых смесей обладают относительно высокой термохимической стойкостью и огнеупорностью.

Промышленное применение находят многочисленные графитовые формовочные смеси, различающиеся по гранулометрическому составу графитового порошка, типу и количеству вводимого в смесь связующего и т.д.

Графитовые формовочные смеси, предназначенные для изготовления уплотняемых форм, классифицируют в зависимости от способа уплотнения и метода их отверждения.

По способу уплотнения они подразделяются на смеси:

- ◇ уплотняемые прессованием — СФТ-1П, АТМ и др.;
- ◇ уплотняемые на формовочных машинах и вручную — СФТ-1, БГУ-1 и т.д.;
- ◇ универсальные — СГУ-1, СГУ-2, СГУ-3 и т.п.

По методу отверждения выделяют формовочные смеси:

- ◇ «холодного» отверждения — СГУ-1, СГУ-3, ВГУ-1 и др., где отверждение происходит в результате полимеризации связующего вещества, вызванной введением в смесь катализатора (например, водный раствор соляной кислоты и др.);
- ◇ «горячего» отверждения — СГУ-2, СФТ-1, СФТ-1П, АТМ и др., в которых полимеризация связующего осуществляется путем нагрева формовочной смеси либо в нагревательных печах, куда загружаются изготовленные элементы литейной формы (смеси СФТ-1, СФТ-1П, СГУ-2 и др.), либо в нагретой металлической оснастке в период прессования элементов литейной формы (смесь АТМ).

Для получения отливок сложной конфигурации, а также имеющих значительные габаритные размеры, используют формы, собранные из отдельных элементов — стержней. Стержни изготавливают преимущественно путем послойного уплотнения (набивки) формовочной смеси в металлических или деревянных ящиках.

Изготовление форм прессованием наиболее эффективно при получении отливок несложной конфигурации с отношением высоты отливок к ее максимальному размеру в поперечном сечении не более 0,8. Формы для таких отливок обычно состоят из двух полуформ и имеют не более двух стержней.

Процесс изготовления форм прессованием имеет преимущества по сравнению с процессом формообразования встряхиванием и ручной набивкой. Метод позволяет повысить чистоту рабочей поверхности и увеличить прочность форм, что важно при центробежном литье отливок. Высокая производительность и достаточно хорошие санитарно-гигиенические условия труда — характерные особенности метода.

Графитовые формовочные смеси, применяемые для изготовления форм прессованием, содержат меньше связующего вещества. Поэтому химическая инертность таких форм выше, чем графитовых форм, получаемых другими методами. Кроме того, эти формы претерпевают меньшие объемные изменения в процессе тепловой обработки, что благоприятно влияет на точность линейных размеров отливок.

Технологический процесс изготовления уплотняемых форм из графитовых формовочных смесей вне зависимости от способа уплотнения и метода отверждения в обобщенном виде однотипен и состоит из следующих основных этапов: приготовление формовочной смеси и контроль ее качества, изготовление полуформ и стержней, отверждение форм («холодное» или «горячее»), обжиг форм и стержней, сборка форм, подготовка форм к заливке.

Процесс приготовления уплотняемых формовочных смесей включает операции:

- приготовление порошка графита и его рассев на фракции;
- приготовление связующего вещества и других вспомогательных материалов;
- перемешивание графитового порошка в бегунах (смесителях) и введение связующего вещества;
- контроль свойств смеси в «сыром» состоянии;
- вылеживание смесей «горячего» отверждения (смеси «холодного» отверждения подаются на формовку после введения катализатора).

Технологические свойства изготавливаемых уплотнением форм (прочность, осыпаемость, газопроницаемость, усадка и др.) в значительной мере зависят от таких основных параметров, как

гранулометрический состав графитового порошка, вид и количество вводимого связующего вещества, время перемешивания формовочной смеси. Для смесей «холодного» отверждения важное значение имеют концентрация и масса вводимого катализатора.

В графитовые формовочные смеси «горячего» отверждения СФТ-1, СФТ-1П в качестве связующего вводят бакелитовый лак — раствор фенолформальдегидной смолы резольного типа в этиловом спирте, в формовочную смесь АТМ — фенолформальдегидную смолу № 18 в смеси с уротропином. Для формовочных смесей «холодного» отверждения используют фурановые смолы.

Перед введением в смесь связующее вещество должно иметь определенные плотность и вязкость. Так, плотность бакелитового лака, вводимого в смеси СФТ-1, СФТ-1П, должна быть 1030 кг/м³, а вязкость фурил-фенолформальдегидной смолы марки ФФ-1СМ — 120–150 с по вискозиметру ВЗ-4.

Перед приготовлением формовочной смеси графитовый порошок просушивают на металлических противнях в электрических печах сопротивления. Температура сушки 150–300 °С, время 2–3 ч. После просушивания порошок рассеивают на вибрационных установках типа Д-500 или СМ-237. В соответствии с требуемым гранулометрическим составом формовочной смеси отбирают нужное количество графитового порошка каждой фракции.

Свойства формовочной смеси и их однородность по всей массе зависят от качества перемешивания огнеупорной основы и связующего вещества. Установлено, что увеличение времени перемешивания смеси в бегунах способствует более равномерному распределению связующего вещества и повышению прочности форм как в сыром, так и в обожженном состояниях. Например, увеличение времени перемешивания в бегунах с 10 до 20 мин приводит к росту прочности в сыром состоянии на 80–120 %, а в обожженном — на 40–70 %. Но так как зерна графита имеют низкую прочность на сжатие, то с увеличением времени перемешивания зерна графита истираются, разрушаются и гранулометрический состав смеси изменяется в нежелательном направлении с изменением технологических свойств форм в сыром и обожженном состояниях. Поэтому оптимальное время перемешивания составляет 15–25 мин до получения прочности смеси в сыром состоянии 0,025–0,05 МПа.

В формовочные смеси «холодного» отверждения вводится катализатор, например водный раствор соляной кислоты. Если приготовленная смесь направляется непосредственно на формовку, то катализатор вводят в формовочную смесь на заключительном этапе перемешивания. Если катализатор вводят в смесь перед формовкой, формовочная смесь из бегунов выгружается в закрытый бункер, где она хранится не более 1–3 сут, а затем в нее добавляют катализатор, перемешивают и направляют на формовку.

Смеси «горячего» отверждения после приготовления направляют либо на формовку (с предварительным вылеживанием 1–3 ч), либо в закрытый бункер, где они могут храниться 1–3 сут.

После приготовления формовочные смеси подвергаются контролю на прочность в сыром состоянии по стандартной методике (три удара копра) и на газопроницаемость (табл. 8.5).

Таблица 8.5. Физико-механические свойства графитовых формовочных смесей

Марка смеси	Свойства сырых образцов		Свойства образцов, обожженных при 1000 °С			
	Прочность на сжатие, МПа	Газопроницаемость, ед.	Прочность на разрыв, МПа	Газопроницаемость, ед.	Осыпаемость, %	Усадка, %
СФТ-1	0,06–0,07		0,8–0,9	150–170	0,10–0,12	2,0–2,2
СФТ-1П	0,07–0,09	Более 25	Более 0,9	Более 90	Менее 0,1	0,9–1,1
СГУ-2	0,018–0,024		0,7–1,1		0,02–0,05	2,2–2,4
СГУ-3	0,018–0,03	50–65	0,6–1,2	80–100	0,02–0,05	1,9–2,0
БГУ-1	0,025–0,05		0,5–0,8	90–150		0,8–0,9

Элементы литейной формы изготовляют путем уплотнения формовочной смеси (прессование, набивка, встряхивание) в литейной оснастке (модели, плиты, жакеты, стержневые ящики и др.).

Оснастка для горячепрессованных форм (смесь АТМ-1) металлическая; для элементов форм, изготавливаемых прессованием из смесей СФТ-1П, СГУ-3, — металлическая, а отдельные части оснастки могут быть изготовлены из твердых пород дерева. Для полуформ и стержней, получаемых набивкой и встряхиванием,

оснастку выполняют как из металла (чугун, углеродистая сталь, алюминиевые сплавы), так и из дерева.

Перед формовкой рабочую поверхность оснастки тщательно очищают и на нее наносят слой разделительного состава. Металлические оснастки покрывают слоем полисилоксановой или другой жидкости, а деревянные — серебристым графитом.

При ручной формовке облицовочный слой формовочной смеси засыпают через сито. Толщина слоя 30–60 мм. При изготовлении элементов формы прессованием в опоку — жакет и наполнительную рамку засыпают весь объем формовочной смеси, необходимой для получения данного элемента.

На рис. 8.3 в качестве примера показана модельная оснастка для прессования графитовых форм.

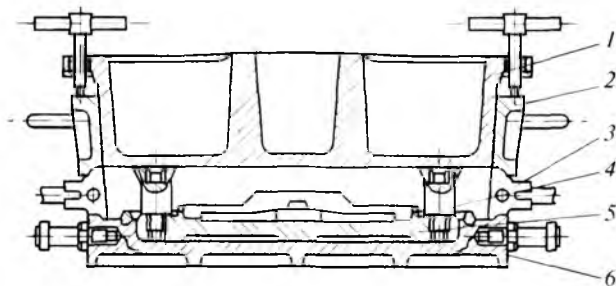


Рис. 8.3. Пресс-форма в сборе:

1 — прессующая колодка; 2 — наполнительная рамка; 3 — опока — жакет; 4 — стержни, оформляющие литниковую систему; 5 — модельная илита с моделью; 6 — подмодельная плита

Различные части форм, получаемых уплотнением, имеют неодинаковую плотность. Для графитовых форм, имеющих градиент плотности по объему, характерны непостоянная и неравномерная усадка в период их тепловой обработки, коробление и образование трещин. Для получения набивных форм, имеющих одинаковую плотность по объему, смесь уплотняется слоями толщиной 30–60 мм.

Градиент плотности особенно велик в формах, получаемых прессованием. В связи с этим оптимальное удельное давление прессования выбирают таким, чтобы форма имела небольшой градиент плотности по объему и необходимую прочность при минимальном содержании связующего.

Недопустимо разрушение зерен графита с ростом давления прессования, так как при этом образуются поверхности, не покрытые связующим веществом. Прочность таких форм после обжига уменьшается. Прочность форм на сжатие в пределах 1,0–3,0 МПа и на разрыв 0,7–1,5 МПа оказывается вполне достаточной, чтобы выдерживать нагрузки, возникающие в формах при центробежном способе литья.

Установлено, что формы, изготовленные прессованием под удельным давлением 3,0 МПа из формовочной смеси СФТ-1П, имеют требуемую прочность, невысокий градиент плотности и необходимый уровень других технологических свойств (газопроницаемость, осыпаемость и т.д.).

Графитовые формы, изготовленные прессованием, содержат меньше связующего, что увеличивает термохимическую инертность и повышает стабильность ее линейных размеров из-за снижения объемных изменений в процессе тепловой обработки.

Изготовление элементов форм методом прессования (удельное давление 3,0 МПа) в нагретой металлической оснастке позволяет уменьшить массу вводимого связующего в формовочные смеси до 7–10 % по сухому остатку. Такие формы обладают еще большей инертностью и более низкой усадкой (0,1–0,2 %).

Полуформы и стержни, изготовленные из формовочных смесей «горячего» отверждения, подвергаются тепловой обработке. Уплотненные полуформы и стержни 6–20 ч выдерживают на воздухе, а затем помещают в электрические калориферные печи и ведут нагрев до 220–250 °С. При максимальной температуре – выдержка в течение 2 ч. После охлаждения форм до 50–60 °С их выгружают из печи и направляют на обжиг.

Изготовленные из холодноотверждающих смесей полуформы и стержни после уплотнения выдерживают в оснастке до полного отверждения (20–60 мин), а затем извлекают из нее и также направляют на обжиг.

В период нагрева в форме могут происходить объемные изменения, понижающие точность линейных размеров отливок. Основными причинами, вызывающими объемные изменения, являются: температурный градиент по объему элементов формы в период нагрева и деформация изготовленных полуформ и стержней под действием собственного веса из-за низкой прочности смеси в

сыром состоянии. Для того чтобы уменьшить неравномерность объемных изменений и деформации, полуформы и стержни после изготовления укладывают на металлические плиты и драйеры, а нагрев их производят с невысокой скоростью (до 30–50 К/ч).

Обжиг форм и стержней проводят в электрических печах сопротивления периодического и методического действия (печи типов Ц-105, Ц-75 и др.). Формы и стержни укладывают на поддон контейнера на графитовую засыпку (рис. 8.4). Контейнер, оборудованный затвором с графитовым порошком, закрывают крышкой и устанавливают в нагревательную печь. Нагрев форм и стержней осуществляется в восстановительной атмосфере, создаваемой газами, которые выделяются при термодеструкции связующего, входящего в состав формовочной смеси.

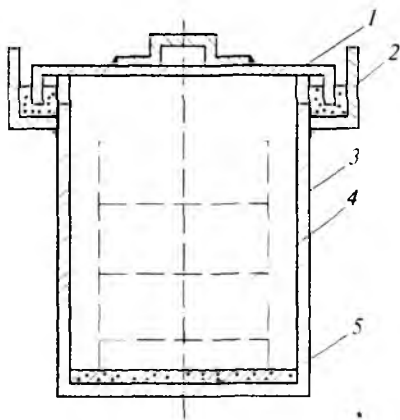


Рис. 8.4. Контейнер для обжига графитовых форм:

1 – крышка контейнера; 2 – графитовая крошка (графитовый затвор); 3 – корпус контейнера; 4 – литейные формы; 5 – слой графитовой крошки

Применяемые в промышленности режимы обжига зависят от марки смеси, метода уплотнения и отверждения, а также от требований, которые предъявляются к качеству отливки. Например, формы и стержни, изготовленные из смеси СФТ-1П, подвергают обжигу по следующему режиму: 1) загрузка контейнеров в печь с температурой не выше 500 °С; 2) нагрев от 500 до 700 °С со скоростью не более 300 К/ч; 3) нагрев от 700 до 1000 °С со скоростью не более 400 К/ч; 4) выдержка 4 ч при температуре 1000 °С.

Для повышения термохимической инертности форм обжиг проводят в вакуумных печах. Технологическая операция обжига определяет такие свойства литейной формы, как термохимическая инертность, стабильность размеров, прочность, осыпаемость

и др. После обжига полуформы и стержни обдуваются сжатым воздухом.

При *сборке форм* в нижнюю полуформу устанавливают стержни. Шаблонами и шупами осуществляют контроль за правильностью установки стержней в соответствии с технологическим процессом на деталь. Установив верхнюю полуформу, форму скрепляют болтами или струбцинами. Небольшие формы могут быть собраны «стопкой» в блок, соединенный с литниковой системой (рис. 8.5).

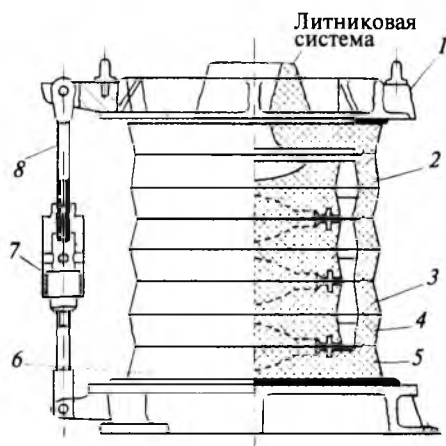


Рис. 8.5. Блок литейных форм:

1 — литниковая чаша; 2 — крышка; 3, 4 — стержни; 5 — основание; 6 — прокладка; 7 — гайки; 8 — тяга

Крупные формы или блоки литейных форм вместе с элементами литниковой системы устанавливают в металлический заливочный контейнер. Зазоры между стенками контейнера и формами засыпают материалом, имеющим объемную массу, близкую к средней объемной массе металла отливки и материала формы (титановая губка, полые алюминиевые шары и др.).

Контейнер с собранными формами устанавливают и закрепляют на центробежном столе плавильно-заливочной установки. После герметизации печи и создания требуемого давления в плавильно-заливочной камере наплавливают необходимую массу жидкого металла. Центробежный стол приводится во вращение и осуществляется заливка литейных форм расплавом.

8.4. Изготовление разъемных оболочковых литейных форм

Литье в оболочковые формы получило значительное распространение при изготовлении мелких и средних по массе отливок (2–15 кг) из всех литейных сплавов, широко применяемых в машиностроении.

Основными преимуществами получения отливок в оболочковых формах по сравнению с литьем в набивные и прессованные литейные формы являются: повышенная геометрическая точность и невысокая шероховатость поверхности отливок, снижение расхода формовочных материалов в 8–10 раз, возможность механизировать и автоматизировать технологический процесс.

Для изготовления оболочковых форм используют формовочные смеси, состоящие из зерен (порошка) огнеупорного материала определенного гранулометрического состава и порошка специального связующего, которое при нагреве сначала размягчается (расплавляется), а затем при небольшом повышении температуры необратимо твердеет, образуя с зернами огнеупорного формовочного материала прочную оболочку. Такими свойствами в качестве связующего вещества обладают термореактивные смолы, которые в виде мелкого порошка вводятся в формовочные смеси в количестве 6–7 % ее массы.

Сущность технологического процесса изготовления оболочковых форм заключается в следующем (см. рис. 8.6). В поворотный стальной бункер 1 (рис. 8.6, а) засыпают формовочную смесь 2, состоящую из зерен огнеупорного материала и порошка связующего — термореактивной смолы. На бункер устанавливается металлическая подмодельная плита 3, на которой закреплены металлические модели отливки и литниковой системы 4. Подмодельная плита и металлические модели должны иметь температуру 200–250 °С, которая может поддерживаться электрическими нагревательными элементами, смонтированными в подмодельную плиту. Перед установкой подмодельной плиты на бункер на ее рабочую поверхность наносят тонкий слой разделительного состава, который препятствует прилипанию формовочной смеси к моделям отливки, литниковой системы и подмодельной плите.

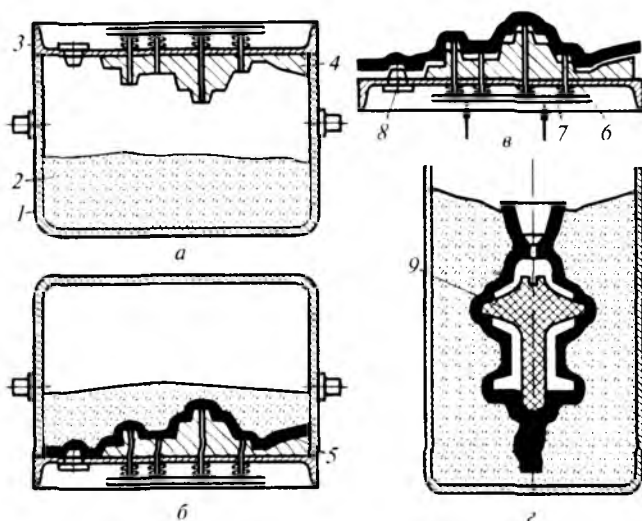


Рис. 8.6. Схема технологического процесса изготовления оболочковых литейных форм:

1 – бункер; 2 – сухая формовочная смесь; 3 – подмодельная плита; 4 – модели отливки и литниковой системы; 5 – оболочка (полуформа); 6 – толкатели; 7 – плита толкателей; 8 – втулка; 9 – стержень

При повороте бункера на 180° (рис. 8.6, б) формовочная смесь падает на горячую плиту и модели. Слой формовочной смеси, прилегающий к плите и моделям, нагревается до такой температуры, при которой связующее начинает плавиться и затем необратимо затвердевать. При выдержке 15–50 с этот процесс получает развитие в слое формовочной смеси толщиной до 6–15 мм, приводя к формированию полутвердой оболочки 5. Затем бункер возвращают в исходное положение, излишек формовочной смеси перемещается в нижнюю часть бункера, а на подмодельной плите и моделях остается оболочка. Плиту снимают с бункера и вместе с оболочкой помещают в нагревательную печь с температурой $300\text{--}350^\circ\text{C}$. За 2–5 мин выдержки в печи происходят затвердевание термоактивной смолы и окончательное затвердевание связующего. С помощью толкателей 6 (рис. 8.6, в), закрепленных в плите 7, оболочку снимают с подмодельной плиты и направляют на сборку литейной формы. При литье отливок ответственного назначения и при их изготовлении из химически активных металлов оболочки

перед сборкой подвергают высокотемпературному обжигу. Сборка оболочковой формы (рис. 8.6, з) заключается в установке стержня 9, фиксации и соединении оболочек (полуформ). Фиксация осуществляется посредством фиксаторов типа выступ—впадина. Впадина в оболочке 5 выполняется с помощью втулки 8, запрессованной в модельной плите.

Собранные формы устанавливают в опоки или контейнеры и засыпают опорным наполнителем (например, кварцевым песком).

Для литья отливок из титановых сплавов применяются оболочковые формы из графитовых формовочных смесей, огнеупорной основой (наполнителем) которых является порошок графита, а в качестве связующего используются синтетические смолы, превращающиеся после тепловой обработки в твердый углеродистый продукт (кокс, полукокс), прочно цементирующий зерна графита. В качестве связующего для приготовления графитовой формовочной смеси применяют пульвербакелит — новолочную фенолформальдегидную смолу марки ПК104, которая поставляется в виде мелкого порошка с добавкой 7,5 % уротропина.

Наибольшее распространение для изготовления оболочковых форм получили графитовые смеси СГО-3 для литья мелких и средних деталей и СГО-4 для литья крупных особо ответственных деталей. Физико-механические свойства смесей представлены в табл. 8.6.

Таблица 8.6. Физико-механические свойства графитовых смесей для оболочковых форм (после обжига форм)

Марка смеси	Прочность, МПа*	Газопроницаемость, ед.	Усадка, %
СГО-3	1,0–1,2	20–30	3,5–4,0
СГО-4	0,8–1,1	Более 30	2,5–3,0

Технологический процесс изготовления оболочковых форм состоит из следующих основных операций: приготовление исходных материалов и формовочной смеси, подготовка модельной оснастки, изготовление оболочки, отверждение оболочковых полуформ и стержней, снятие оболочковых полуформ и стержней с модельной оснастки, высокотемпературная тепловая обработка (обжиг) оболочковых полуформ и стержней, сборка форм и подготовка их под заливку жидким металлом. Основными технологи-

ческими операциями, определяющими процесс изготовления оболочковых форм и их свойства, являются: приготовление формовочной смеси, формирование и отверждение оболочки, тепловая обработка оболочки.

В связи с невысокой прочностью графита и небольшой толщиной оболочки возникает задача обеспечения необходимой прочности оболочки.

Установлено [3, 4], что прочность форм зависит от плотности укладки огнеупорных зерен формовочной смеси и длины границы контакта между зернами после засыпки формовочной смеси на металлическую модель, а также от типа и массы вводимого связующего. На прочность оказывает влияние также режим отверждения оболочки и тепловой их обработки.

Высокая плотность укладки зерен огнеупорного наполнителя при засыпке формовочной смеси на модельную оснастку может быть достигнута при использовании графитового порошка относительно мелких фракций, но при этом резко снижается газопроницаемость. Так как оболочка должна обладать не только достаточной прочностью, но и определенной газопроницаемостью, которая особенно важна на этапе тепловой обработки формы, можно сделать вывод: формовочная смесь должна состоять из зерен графитового порошка, имеющих относительно крупную фракцию и служащих основой смеси, и зерен мелкой фракции, которые частично заполняют пустоты между зернами крупной фракции и увеличивают тем самым границу контакта.

Поэтому широко применяется графитовая формовочная смесь, имеющая следующий зерновой состав: 66–75 % графитового порошка зернистостью 0,4 мм и 34–25 % дополнительной мелкой фракции 0,063–0,16 мм.

Применяемое оборудование и технология приготовления оболочковых графитовых смесей в основном не отличаются от приготовления песчано-смоляных неплакированных смесей. Однако есть ряд особенностей, связанных со свойствами графита: во-первых, низкая прочность зерен графита, вследствие чего во избежание их разрушения следует ограничивать время перемешивания в бегунах; во-вторых, из-за склонности графитовых смесей к комкованию нецелесообразно применение общепринятых методов плакирования и увлажнения в процессе приготовления формовочных смесей.

Приготовление формовочной смеси осуществляют в смешивающих бегунах или специальных смесителях. Предварительно графитовый порошок размалывают и просеивают. Пульвербакелит просеивают через сито с ячейкой 0,63 мм. Необходимое количество порошка графита и пульвербакелита загружают в смеситель и перемешивают 20–25 мин. Полученную смесь подают на место формовки.

В процессе формирования оболочки графитовые формовочные смеси прилипают к рабочей поверхности нагретой модельной оснастки, что ухудшает качество поверхности оболочковых форм, снижает размерную точность, приводит к росту брака. Поэтому на нагретую до 200–250 °С модельную оснастку наносят разделительный состав, который образует на ней термостойкую пленку и обеспечивает необходимую чистоту поверхности изготавливаемых полуформ и стержней.

Из всех применяющихся разделительных составов лучшим по своим технологическим свойствам является разделительный состав из кремнийорганического термостойкого каучука.

Графитовые оболочковые полуформы и стержни производятся на машинах из формовочных смесей на основе кварцевого песка (СКФ-2М, ОЛФ-1, УОФ-1, АКФ-2К, 832, 873 и др.). Независимо от конструктивных особенностей эти машины имеют печь для нагрева модельной оснастки, бункер для формовочной смеси, механизмы для нанесения формовочной смеси на модельную плиту, съема оболочковых полуформ с модельной плиты и др.

Формовочные машины по способу нанесения формовочной смеси делят на два типа — со свободной засыпкой и пневматической подачей смеси. Наиболее распространены машины со свободной засыпкой смеси. Модели, подмодельные плиты, стержневые ящики и другие элементы литейной оснастки изготавливают из чугуна, углеродистых и низколегированных сталей, алюминиевых сплавов. Латунь и бронзу применяют в случае литья особо ответственных и точных отливок.

Подготовка модельно-стержневой оснастки к работе заключается в протирке деталей, их промывке в органических растворителях или в обезжиривающих химических составах. Лучшим растворителем жиров является трихлорэтилен; применяют также скипидар, керосин и др. Химическое обезжиривание деталей модельной оснастки из стали, чугуна и цветных металлов осуществляется в горячих химических составах (70–90 °С). По обезжиривающей

способности наилучшими являются растворы каустической соды, фосфорно-кислого натрия, кальцинированной соды в воде.

Перед покрытием модельно-стержневой оснастки разделительным составом ее рабочую поверхность тщательно очищают, протирают тряпкой, слегка пропитанной бензином или керосином, обдувают струей теплого воздуха.

Подготовленную модельно-стержневую оснастку нагревают до 189–200 °С и с помощью пульверизатора на ее рабочую поверхность наносят тонкий слой разделительного состава. Затем оснастку помещают в печь и выдерживают 30 мин при температуре 200–250 °С. Эту операцию повторяют 3–4 раза до получения пленки толщиной 0,2–0,8 мм. В процессе работы через каждые 3–4 съема оболочек наносится слой разделительного состава. Сушка в этом случае длится 5–10 мин.

Технологический процесс получения оболочковых полуформ методом свободной засыпки состоит в том, что подмодельную плиту, нагретую до 200–250 °С, с укрепленными на ней моделями отливки и литниковой системой устанавливают на опрокидывающийся бункер с графитовой смесью и закрепляют на нем. При повороте бункера на 180° графитовая смесь падает на модель. Под действием теплоты модельной оснастки пульвербакелит в слое формовочной смеси, прилегающей к модельной оснастке, плавится и смачивает зерна графита. Длительность выдержки графитовой формовочной смеси составляет 30–50 с. За это время пульвербакелит плавится в слое формовочной смеси толщиной 12–15 мм, а сам слой уплотняется массой смеси, находящейся в бункере. После выдержки бункер возвращается в первоначальное положение, а излишняя смесь с подмодельной плиты осыпается в нижнюю часть бункера.

Толщина образующейся оболочки $\delta_{об}$ при выдержке формовочной смеси на нагретой модельной оснастке и, следовательно, ее прочность и другие свойства зависят от температуры модели и времени выдержки:

$$\delta_{об} = 4,88 \left[1 - \frac{8,2}{\sqrt{t_m - t_{нач}}} \right] \tau,$$

где $\delta_{об}$ — толщина оболочки, м; t_m — температура модельной оснастки, °С; $t_{нач}$ — начальная температура формовочной смеси, °С; τ — время выдержки смеси на плите, с.

Средняя толщина оболочки полуформы не должна превышать 12–16 мм. Модельную плиту вместе с образовавшейся на ней оболочковой полуформой помещают в нагревательную печь на 5–7 мин с целью ее отверждения.

Оптимальная температура отверждения оболочки, при которой достигается максимальная прочность графитовой оболочки до обжига, равна 300 °С.

После отверждения оболочки модельную оснастку извлекают из печи и с помощью выталкивающего механизма снимают с оснастки и направляют на обжиг при температуре 1000 °С. Цель тепловой обработки — обеспечить необходимые технологические свойства оболочке — химическую инертность по отношению к титану, низкую газотворность, требуемую газопроницаемость, прочность и др. При обжиге из пульвербакелита выделяется значительное количество газов, что может вызвать значительные объемные изменения оболочки и привести к ее растрескиванию и короблению. Поэтому режим тепловой обработки оболочек (скорость нагрева, изотермические выдержки) выбирается с учетом интенсивности газовыделения в процессе нагрева.

Установлено, что при температурах 500–550, 650–700, 900–1000 °С наблюдается наибольшая интенсивность газовыделения. Поэтому при нагреве оболочек предусматривают изотермические выдержки при указанных температурах.

Режим тепловой обработки оболочковых полуформ подобен режимам тепловой обработки литейных форм, изготовленных литьем по выплавляемым моделям, прессованием, и других форм, изготовленных из графитовых формовочных смесей. Достаточно высокая газопроницаемость оболочки и малая толщина позволяют несколько увеличить скорость нагрева оболочек между изотермическими выдержками.

Общий цикл тепловой обработки оболочек колеблется в пределах 10–20 ч. Для предупреждения окисления графитовых оболочек обжиг ведут в восстановительной атмосфере, а их охлаждение осуществляют до 400 °С вместе с печью. Для предотвращения коробления оболочки при тепловой обработке жестко скрепляют друг с другом струбцинами, болтами. После тепловой обработки оболочки контролируют, производят их сборку и установку в заливочный контейнер, который затем устанавливается в плавно-заливочную установку.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите способы изготовления литейных форм, используемых для производства отливок из титановых сплавов.
2. Исходя из особых свойств титана и его сплавов каким требованиям должна удовлетворять форма для изготовления отливки из титанового сплава?
3. Из каких формовочных смесей изготавливают формы для отливок из титановых сплавов?
4. Перечислите достоинства и недостатки графитовых формовочных смесей для изготовления литых форм.
5. Назовите огнеупорные оксиды, которые используют для изготовления литейных форм. Укажите их свойства и область применения.
6. Назовите связующие вещества, которые используются для изготовления графитовых и керамических литых форм.
7. Опишите технологический процесс изготовления литейных форм графитовой формовочной смеси по выплавляемым моделям.
8. Приведите составы графитовых формовочных смесей для изготовления литейных форм методом уплотнения.
9. Составьте схему технологического процесса изготовления литейной формы из графитовой формовочной смеси методом уплотнения.
10. Почему литейные графитовые формы, изготовленные прессованием, обладают наименьшей химической активностью по отношению к титану и его сплавам?
11. С какой целью изготовленные литейные формы, предназначенные для производства титановых отливок, перед заливкой расплавом подвергают высокотемпературному обжигу?

ГЛАВА 9 ФОРМИРОВАНИЕ ОТЛИВКИ

9.1. Этапы формирования отливки

Формирование отливки начинается с момента поступления первых порций жидкого металла в полость литейной формы, а завершается после извлечения отливки из формы и ее охлаждения до комнатной температуры.

Период формирования разделяют на следующие четыре основных последовательно развивающиеся этапы: 1) заполнение рабочей полости литейной формы расплавом; 2) охлаждение жидкого металла от температуры, которую он имел после завершения заполнения, до температуры кристаллизации (для сплавов, кристаллизующихся в интервале температур, до температуры ликвидуса); 3) кристаллизация металла и затвердевание отливки; 4) охлаждение затвердевшей отливки до комнатной температуры.

Эта последовательность этапов формирования прослеживается в элементарном объеме отливки, расположенном в любой ее части. В масштабах всей отливки одновременно могут развиваться процессы, характерные для разных этапов. Например, в один и тот же момент времени центральная часть отливки может находиться в жидком состоянии, периферийная — в твердом, а в средней развивается процесс затвердевания.

На *этапе заполнения* жидкий металл из плавильной печи или раздаточного тигля переливают в литниковую чашу и по каналам литниковой системы он поступает в полость литейной формы, где формируется рабочая часть отливки, из которой после термической и механической обработки получают конкретную деталь.

Литниковые системы должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) обеспечивать полное заполнение рабочей полости литейной формы жидким металлом;

- 2) способствовать такому распределению температуры в металле отливки после заполнения формы расплавом, чтобы процесс затвердевания металла развивался последовательно в направлении к прибылям, установленным на рабочей части отливки;
- 3) предотвращать образование в рабочей части отливки дефектов – газовых раковин, неметаллических включений, неспаев и др., связанных с гидродинамическими и другими процессами, развивающимися на этапе заполнения формы расплавом.

Первое требование к литниковым системам в условиях литья титановых сплавов решается путем значительного увеличения скорости течения расплава по каналам формы, что обеспечивается применением центробежного способа литья.

Второе требование при центробежном способе литья практически не реализуется, так как при этом первые порции жидкого металла сначала протекают по каналам литниковой системы и рабочей полости литейной формы, а затем поступают в полость формы, где формируются прибыли. Поэтому после полного заполнения формы расплавом температура металла, находящегося в прибыльной части отливки, оказывается меньше, чем в других ее частях. Подобное распределение температуры по объему отливки перед началом ее затвердевания препятствует направленному и последовательному затвердеванию металла и формированию отливок высокого качества. Высокие скорости течения жидкого металла в период заполнения литейной формы вызывают турбулентное движение металла, и при наличии литейных гидравлических сопротивлений (внезапное расширение или сужение потока, изменение направления движения и др.) в потоке возникают области с пониженным давлением, в которых металл интенсивно взаимодействует с газами, выделяющимися из материала литейной формы, приводя к повышению содержания вредных примесей в металле и образованию газовых раковин.

Поэтому для производства отливок из титановых сплавов методом центробежного литья применяют специальные литниковые системы, которые обеспечивают заполнение форм с высокой скоростью течения расплава; кроме того, заполнение рабочей части литейной формы осуществляется компактным сплошным потоком жидкого металла без его разбрызгивания и образования отдельных струй и вихрей. Применение подобных литниковых систем при центробежном литье фасонных отливок позволяет из-

готовлять сложные по конфигурации, тонкостенные и крупногабаритные отливки с достаточно высоким качеством металла.

Для изготовления простых по конфигурации и небольших размеров отливок применяют стационарный способ заполнения форм, т.е. под давлением металлостатического напора жидкого металла.

Применяемые для стационарного способа литья литниковые системы по своей конструкции и назначению практически не отличаются от литниковых систем, используемых при производстве отливок из других сплавов.

На *этапе охлаждения жидкого металла* получают развитие химико-физические процессы на границе жидкий металл – литейная форма.

В результате химического взаимодействия титана с материалом формы и газами, выделяющимися из нее в результате нагрева, металл насыщается вредными примесями. При определенных условиях литья на поверхности отливок может образоваться как химический, так и механический «пригар», который формируется в результате проникновения жидкого металла в капиллярные каналы поверхностного слоя литейной формы.

Так как жидкий титан обладает чрезвычайно высокой химической активностью, то основная задача на данном этапе формирования отливки заключается в разработке такого технологического процесса литья, при котором непосредственный контакт жидкого металла с материалом литейной формы сведен к очень короткому отрезку времени (менее 1–2 с). Это условие может потерять свое значение при изготовлении отливок в формах, материал которых обладал бы абсолютной химической стойкостью по отношению к титану. Применяемые в настоящее время огнеупорные формовочные материалы для изготовления литейных форм, а также процесс их подготовки к заливке жидким сплавом (сушка, обжиг, нанесение покрытий и др.) не обеспечивают требуемой химической инертности материала литейных форм.

На *этапе кристаллизации металла и затвердевания отливки* формируется структура металла, развиваются усадочные процессы, приводящие к образованию в отливках усадочных раковин и пористости, горячих (кристаллизационных) трещин. Периферийные слои отливки, контактирующие с литейной формой, насыщаются вредными примесями в результате химического взаимодействия металла с материалом литейной формы и газами, которые выделяются из нее.

Чтобы исключить образование дефектов усадочного происхождения в рабочей части отливки, необходимо разработать соответствующий технологический процесс изготовления отливки, при котором затвердевание металла развивалось бы последовательно в направлении, противоположном вектору силы, возникающей при центробежном способе литья. При этом затвердевание металла должно завершаться в прибыльной части отливки.

Этап охлаждения затвердевшей отливки завершается при достижении отливкой комнатной температуры. При этом охлаждение отливки от температуры кристаллизации до температуры 400–450 °С происходит в вакуумной камере плавления-заливочной установки, а затем в атмосфере воздуха.

При высоких температурах (более 1000 °С) титан активно взаимодействует с материалом литейной формы и поверхностные слои отливки обогащаются вредными примесями – кислородом, азотом, углеродом, кремнием. На поверхности отливки образуется газонасыщенный (альфированный) поверхностный слой повышенной твердости. При наличии такого слоя конструктивные характеристики литых деталей ухудшаются, усложняется механическая обработка отливок, возникают проблемы с повторным вовлечением литейных отходов в переплавку из-за повышенного содержания в них вредных элементов.

На данном этапе формирования в отливке могут возникнуть внутренние литейные напряжения, которые вызывают коробление отливок и образование в них холодных трещин. Однако, как показывает практика фасонного литья титановых сплавов, подобные дефекты редко встречаются в реально изготавливаемых в настоящее время отливках.

Таким образом, при разработке технологического процесса изготовления отливок из титановых сплавов особое внимание следует обращать, во-первых, на процесс заполнения, от которого зависит не только полное заполнение рабочей полости литейной формы расплавом, но и создание благоприятных тепловых условий для развития процесса затвердевания металла в масштабе всей отливки и, во-вторых, на разработку мероприятий, направленных на снижение загрязнения металла вредными примесями, попадающими в металл в результате химического взаимодействия с материалом литейной формы и газовой средой, окружающей отливку в период ее формирования.

9.2. Заполнение форм расплавом при стационарной заливке

Для получения деталей из титановых сплавов в вакуумных плавильно-заливочных установках применяют в основном центробежный способ заполнения литейных форм. Детали небольших габаритов и простой конфигурации могут быть изготовлены путем заливки расплава в неподвижные формы (стационарная заливка).

Стационарная заливка под напором жидкого металла в стояке наиболее проста, обеспечивает течение металла в виде компактного потока без его разбрызгивания. Однако невысокие скорость течения расплава и давление в металле снижают заполняемость и способствуют внедрению в поток жидкого металла пузырьков газа, выделяющихся из формы. В условиях литья в вакууме при стационарной заливке снижается эффективность работы прибылей, что может привести к образованию усадочных дефектов в отливках.

Для стационарной заливки форм применяют расширяющиеся литниковые системы с нижним и боковым (шелевым) подводом металла, обеспечивающие поступление металла в полость формы с массовой скоростью не менее 10–30 кг/с. Необходимый расход металла обеспечивается применением литниковых систем с соотношением $F_{\text{ст}} : F_{\text{шл}} : F_{\text{пит}} = 1 : 3 : 4$ или $1 : 2 : 2,5$ ($F_{\text{ст}}$, $F_{\text{шл}}$, $F_{\text{пит}}$ – площади сечения элементов литниковой системы – стояка, шлакоуловителя, питателя) и площадями сечений литниковых каналов на 20–30 % большими, чем при литье углеродистой стали. Толщину питателей принимают не менее 6–8 мм при минимальной (не менее 15 мм) длине. С целью уменьшения потерь теплоты литниковые каналы принимают по возможности короткими, а их сечения – круглыми или близкими по конфигурации к квадрату.

При выборе положения отливки в форме, типа литниковой системы, конфигурации и размеров литниковых каналов, места подвода питателей к отливке руководствуются теми же правилами, что и при разработке технологии изготовления отливок из алюминиевых и магниевых сплавов.

Для обеспечения питания затвердевающих тепловых узлов титановых отливок применяют установку прибылей на каждом из

них. Общие прибыли малоэффективны из-за низкой теплопроводности титановых сплавов, высокой скорости затвердевания и отсутствия атмосферного давления. Диаметр основания прибыли при литье в металлические и графитовые кокили должен составлять не менее удвоенной толщины питаемого узла; при литье в уплотняемые формы — 2,5 толщины, а при заливке в оболочковые формы — 3,0 толщины питаемого узла. Высоту прибыли принимают обычно равной двойной высоте питаемого узла, но не менее основания прибыли.

Чтобы улучшить заполняемость и условия питания отливок при стационарной заливке, целесообразно использовать устройства, позволяющие в период заполнения и затвердевания создавать дополнительное давление на жидкий металл с помощью инертных газов (вакуумно-компрессионное литье) или электромагнитных кондукционных насосов.

Для литья титановых сплавов под электромагнитным давлением находят применение кондукционные МГД-насосы постоянного тока. Они работают следующим образом. Канал насоса размещают в магнитном поле электромагнита, а через жидкий металл в канале пропускают электрический ток. В результате на металл воздействует объемная электромагнитная сила, которая создает в нем избыточное давление и обеспечивает его движение.

Давление, развиваемое насосом в металле, рассчитывают по формуле

$$p = \frac{B}{hR} \left(I - \frac{q_1 BQ}{h} \right),$$

где I — сила тока в канале; B — индукция магнитного поля; h — толщина канала; Q — расход металла в канале; R — статический параметр ($R = 0,6$ – $0,9$ в зависимости от конструкции насоса); q_1 — динамическая шунтирующая проводимость.

При $Q = 0$ давление насоса увеличивается: $p = BI/(hR)$.

Канал насоса является частью литниковой системы и может располагаться вертикально или горизонтально (рис. 9.1). В обоих случаях расход металла в канале ограничивается напором в стояке H :

$$Q_{\max} = \mu_b h b \sqrt{2gH},$$

где μ_b — коэффициент расхода литниковой системы от литниковой чаши до входа в канал насоса; b — ширина канала.

Если режим работы насоса соответствует расходу, превышающему $Q_{\max}$ то на входе в его канал произойдет разрыв потока, что не допускается. Следовательно, на этапе заполнения формы металлом давление, создаваемое насосом, должно быть таким, чтобы компенсировать потери напора на гидравлических сопротивлениях в литниковой системе за каналом насоса и в полости формы. При заливке под давлением можно увеличить скорость течения металла в полости формы в 2–2,5 раза по сравнению с заливкой только под напором металла в стояке. Можно также заливать формы, высота которых больше высоты стояка.

При вертикальном расположении канала насоса (рис. 9.1, а) его пропускная способность ниже, чем при горизонтальном расположении (см. рис. 9.1, б), вследствие роста металлического напора над каналом. Кроме того, горизонтальное расположение канала позволяет уменьшить расход металла на литниковую систему, так как удается почти полностью слить металл из стояка.

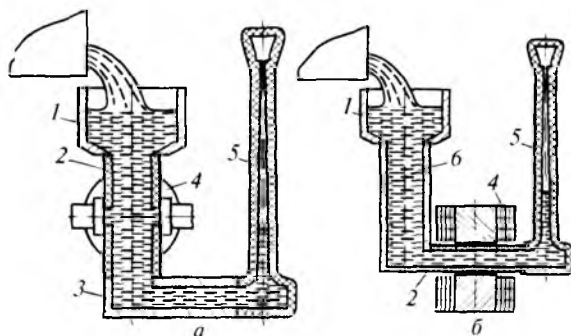


Рис. 9.1. Вертикальное (а) и горизонтальное (б) расположения канала насоса в литниковой системе отливки:

1 — литниковая чаша; 2 — канал насоса; 3 — литниковый ход; 4 — насос; 5 — отливка; 6 — стояк

Заполнение формы металлом производят при давлении насоса 0,01–0,05 МПа, что обеспечивает требуемую скорость течения металла в полости формы и исключает разрывы потока на входе в канал насоса. После заполнения формы давление повышают до 0,12–0,3 МПа с целью улучшения питания отливки и предотвращения образования газовой пористости.

Насос создает давление в жидком металле отливки до тех пор, пока не закристаллизуется металл в канале насоса. Поэтому долж-

на соблюдаться следующая последовательность затвердевания: отливка — литниковая система — канал насоса. Толщина наибольшего питаемого насосом узла отливки должна быть меньше толщины канала. Если это условие не выполняется, то на тепловой узел устанавливают прибыль.

Канал насоса изготавливают из графито-смоляной смеси и используют для одной заливки. Неразъемные каналы обычно выполняют ручной набивкой, а разъемные (из двух частей) — «горячим» или «холодным» прессованием. Каналы 3–4 ч подвергают тепловой обработке в нейтральной атмосфере при 950–1000 °С.

Улучшение заполняемости форм и повышение качества титановых отливок могут быть достигнуты при заливке под избыточным давлением инертного газа. Для этого разработан и опробован вакуумно-компрессионный способ литья титановых сплавов, разработанный в РГТУ—МАТИ им. К.Э. Циолковского. Сущность способа заключается в следующем (рис. 9.2). Рабочее пространство плавильно-заливочной установки разделено перегородкой 4 на две камеры — плавильную А и заливочную Б. Литейная форма 5 установлена в заливочной камере, литниковая воронка 2 — в плавильной. При этом форма герметично отделена от воронки металлической пластиной 3. В заливочной камере в течение всего рабочего процесса поддерживают вакуум, в плавильной камере создают избыточное давление инертного газа (аргона) к концу плавления металла (или ведут плавку в атмосфере инертного газа). После слива металла из плавильного тигля 1 в литниковую воронку металлическая пластина проплавляется, и жидкий металл под избыточным давлением газа заполняет форму.

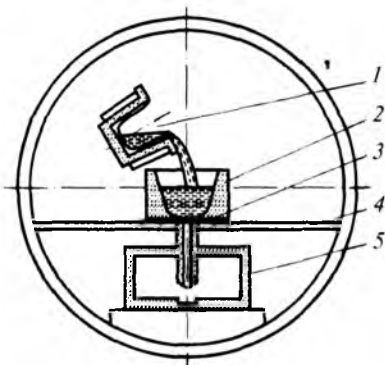


Рис. 9.2. Схема вакуумно-компрессионного способа литья

В период заполнения формы может произойти прорыв газа из плавильной камеры через металл, находящийся в литниковой воронке, в полость формы. При этом в отливке образуются крупные газовые раковины. Чтобы исключить прорыв газа, металл в воронке не должен опускаться ниже критической высоты $H_{кр}$, зависящей от давления газа P и диаметра сливного отверстия $d_{сл}$ (рис. 9.3).

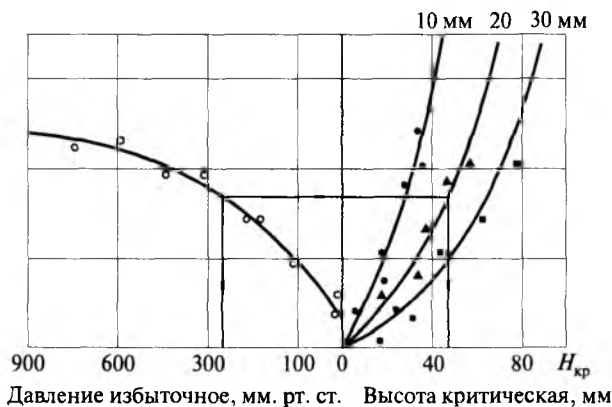


Рис. 9.3. Номограмма для определения критической высоты уровня металла $H_{кр}$, мм, в литниковой воронке

Прорыв газа может произойти также во время заполнения литейной воронки жидким металлом, если уровень металла в воронке в момент проплавления (разрушения) металлической пластины окажется ниже критического. Поэтому время разрушения пластины должно быть больше времени слива металла в воронку до уровня, превышающего критический. Необходимое время разрушения пластины из данного материала (целесообразно применять титан) обеспечивается путем выбора ее толщины.

Опробование вакуумно-компрессионного литья титановых сплавов показало, что при давлении аргона 800–1000 ГПа наблюдается значительное повышение заполняемости формы металлом и плотности металла отливок. На рис. 9.4 представлены зависимость заполняемости титаном литейной формы, изготовленной прессованием из формовочной смеси СФТ-1П, со спиральным каналом от давления аргона и результаты измерений плотности плоских отливок (200×50×3 мм) из сплава ВТ-1Л, полученных вакуумно-компрессионным способом.

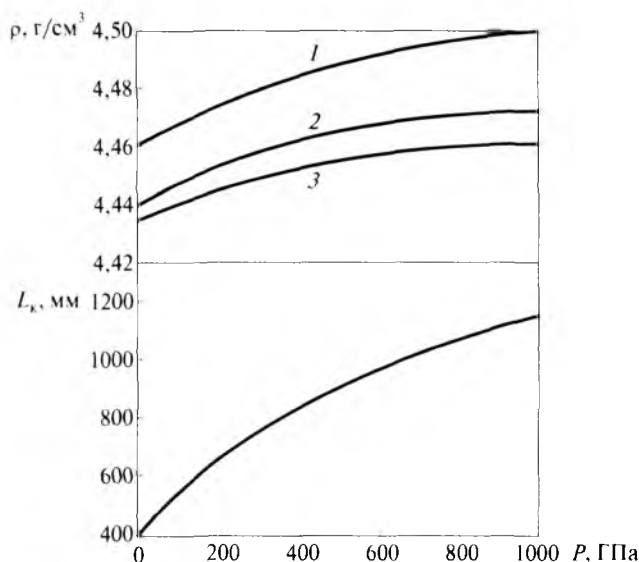


Рис. 9.4. Зависимости заполняемости графитовой формы (L — длина заполненного участка) и плотности титановой отливки ρ толщиной 8 мм (кривая 1), 5 мм (кривая 2) и 3 мм (кривая 3) от давления аргона

9.3. Заполнение форм при центробежном литье отливок

В настоящее время большинство отливок из титановых сплавов получают методом центробежного литья на центробежных машинах с вертикальной осью вращения. Возникающая при вращении центробежная сила резко увеличивает скорость течения жидкого металла в полости литейной формы и давление жидкого металла на стенки литейной формы, что значительно улучшает заполняемость и уменьшает вероятность образования газовых раковин в отливках.

Центробежная сила F , возникающая в металле отливки и материале литейной формы, зависит от угловой скорости и расстояния от оси вращения:

$$F = m\omega^2 r,$$

где m — масса, сосредоточенная в рассматриваемой точке; r — расстояние от рассматриваемой точки до оси вращения (радиус вращения), м; ω — угловая скорость, рад/с.

Угловая скорость связана с частотой вращения (числом оборотов в минуту) n следующим соотношением:

$$n = 30\omega / \pi.$$

Центробежную силу, отнесенную к единице объема, называют удельной:

$$f = \rho\omega^2 r,$$

ρ — плотность титановой отливки.

Отношение удельной центробежной силы к удельному весу металла γ называется коэффициентом утяжеления K :

$$K = \rho\omega^2 r / \gamma.$$

Поскольку $\gamma = \rho q$, то

$$K = \omega^2 r / q,$$

где q — ускорение силы тяжести.

Эта величина характеризует изменение веса металла в поле центробежных сил по сравнению с его весом в поле гравитационных сил.

Давление в металле P определяется уравнением

$$P = \gamma \left[\frac{\omega^2 (r_2^2 - r_1^2)}{2q} + h \right],$$

где r_1 — радиус свободной поверхности; r_2 — радиус вращения рассматриваемой точки; h — высота столба жидкого металла под рассматриваемой точкой.

На рис. 9.5 представлена зависимость коэффициента утяжеления K и давления P от числа оборотов центробежного стола n и радиуса вращения. Обычно при литье отливок из титановых сплавов $n \approx 200$ – 300 об/мин. При таких частотах вращения коэффициент K находится в пределах 25–60, а давление в металле возрастает до 0,5–0,75 МПа.

На практике нередки случаи, когда литейная форма под действием давления металла деформируется или разрушается. Установлено, что при существующем технологическом процессе изготов-

ления литейных форм давление жидкого металла на литейную форму должно находиться в пределах от 0,12 МПа до значения, которое она выдерживает без заметной деформации и разрушения.

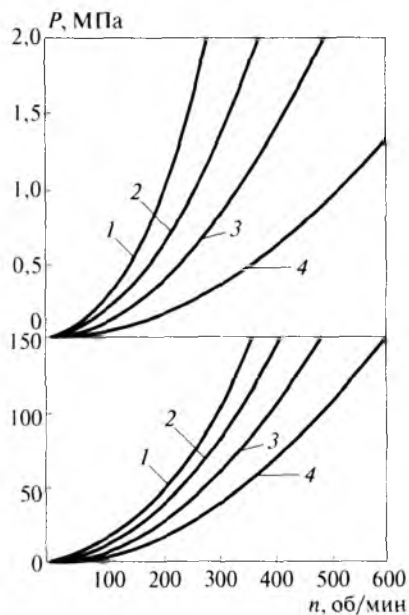


Рис. 9.5. Зависимости коэффициента утяжеления K и давления P от частоты вращения центробежного стола n :

1 — 1000 об/мин; 2 — 800 об/мин;
3 — 600 об/мин; 4 — 400 об/мин

Перед заливкой изготовленные формы устанавливаются в контейнер, который помещается в камеру плавления-заливочной установки и закрепляется на столе центробежной машины. Перед установкой контейнера формы, изготовленные прессованием, ручной набивкой, а также разъемные оболочковые формы прочно скрепляются болтами и струбцинами. В контейнер устанавливается несколько литейных форм с элементами литниковой системы. Чтобы исключить смещение литейных форм при вращении контейнера, они закрепляются в нем. Способы установки и закрепления форм в контейнере представлены на рис. 9.6.

Сборка форм в засыпке (рис. 9.6, а) наиболее проста и доступна и находит применение при индивидуальном и малосерийном производстве. Плотность засыпки должна быть почти такой же, как у материала литейной формы. Наибольшее распространение в качестве материала засыпки получили низкокачественные некондиционные сорта титановой губки, а также алюминиевые шары с

цилиндрическими отверстиями. Сборка форм в универсальном кондукторе (рис. 9.6, б) распространена в крупносерийном производстве. Достоинствами этого способа являются исключение операции засыпки форм и значительное снижение массы контейнера. Сборка форм в специальном кондукторе (рис. 9.6, в) производится при литье в кокиль отливок сложной конфигурации. Сборка форм в индивидуальных контейнерах с использованием засыпки и кондуктора (рис. 9.6, г) применяется обычно для форм, изготовленных по выплавляемым моделям.

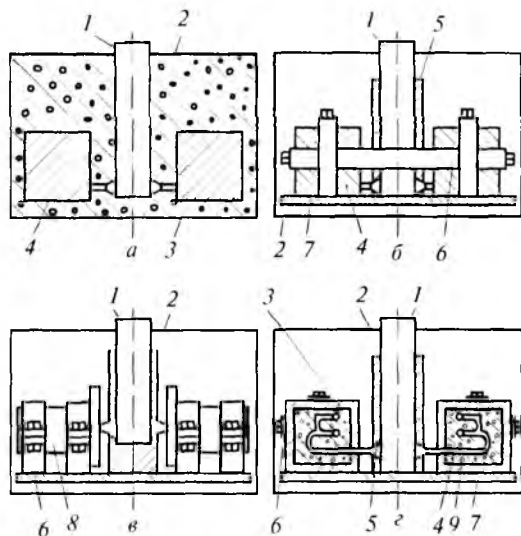


Рис. 9.6. Схемы сборки форм для центробежной заливки:

а — в засыпке; *б* — в универсальном кондукторе; *в* — в специальном кондукторе; *г* — в индивидуальных контейнерах и кондукторе; 1 — центральный стояк; 2 — контейнер; 3 — засыпка; 4 — форма; 5 — приспособление для крепления стояка; 6 — кондуктор; 7 — поддон; 8 — кокиль; 9 — индивидуальный контейнер

9.4. Литниковые системы для центробежного литья

Для центробежной заливки используют литниковые системы, построенные по принципу сифонного заполнения формы. Они имеют вертикальные и горизонтальные каналы, рас-

положенные в плоскости разъема формы, и питатели с подводом металла к тонким сечениям отливок.

На рис. 9.7 показана в качестве примера литниковая система, используемая при центробежном способе литья. Элементы литниковой системы, изготовленные, как правило, из тех же формовочных смесей, что и элементы формы (центральный стояк 5, литниковый ход 9, колодец 6), и литейные формы устанавливают в металлический заливочный контейнер 4. Свободное пространство между стенками контейнера и формами заполняют титановой губкой или каким-либо другим наполнителем. Заполненный и закрытый крышкой контейнер перед началом плавки закрепляют на центробежном столе 10 плавно-заливочной установки. После наплавления металла центробежный стол приводится во вращение с помощью электропривода 11.

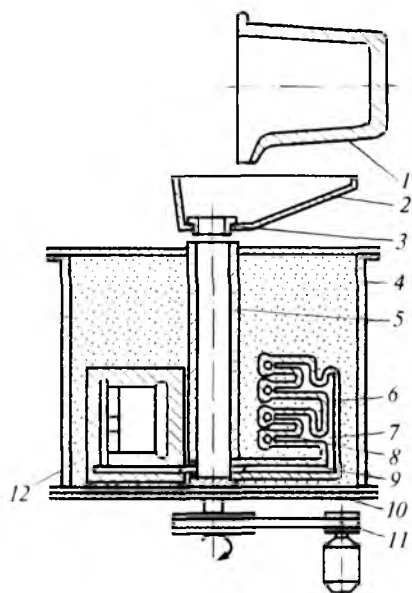


Рис. 9.7. Заливочный контейнер и литниковая система:

1 - тигель; 2 - приемно-направляющий лоток; 3 - направляющая втулка; 4 - заливочный контейнер; 5 - центральный стояк; 6 - колодец; 7 - питатель; 8 - отливка; 9 - литниковый ход; 10 - центробежный стол; 11 - привод центробежного стола; 12 - наполнитель

Из тигля 1 металл сливается в приемно-направляющий лоток 2 и через направляющую втулку 3 попадает в центральный стояк 5, откуда движется по литниковому ходу 9 и затем поднимается по колодцу 6. Под действием избыточного давления, развиваемого центробежными силами, жидкий металл из вертикального колодца по питателям 7 попадает в рабочую часть формы 8 и заполняет ее.

Размеры сечений указанных элементов литниковой системы определяют исходя из следующих двух основных положений:

- 1) постоянный расход жидкого металла на всем пути движения металла от направляющей втулки до рабочей части отливки;
- 2) скорость движения потока, достаточная для обеспечения заполнения рабочей полости формы.

Расчеты и практика позволили определить основные параметры элементов литниковой системы, удовлетворяющие указанным требованиям.

Расход металла при его сливе из тигля в приемно-направляющий лоток составляет 30–50 кг/с. Диаметр сливного отверстия приемно-направляющего лотка колеблется в пределах 80–120 мм. Длина центрального стояка соответствует высоте заливочного контейнера, а внутренний диаметр равен 120–400 мм. В зависимости от числа форм, устанавливаемых в контейнере, и их расположения в нем центральные стояки имеют 4, 8 или 12 литниковых отверстий диаметром 30–50 мм. Литниковые ходы 9, как правило, выполняют цилиндрическими с внутренним диаметром 30–50 мм, а в отдельных случаях коническими. Геометрические размеры колодца 6 (или коллектора) выбирают в зависимости от конфигурации отливки и ее расположения в контейнере. Площадь сечения этих элементов литниковой системы принимают равной площади сечения литникового хода на его выходе.

Размеры сечений питателей 7 и их число должно быть таким, чтобы обеспечивалось постоянство расхода металла и не возникал перегрев литейной формы в месте подвода металла, приводящий к образованию механического пригара. Установлено, что эти условия соблюдаются, если через каждый 1 см² сечения питателя в процессе заполнения будет проходить не более 2 кг металла. Форма сечения питателя может быть различной (прямоугольник, круг, трапеция и т.д.).

Отливки из титановых сплавов часто имеют такие дефекты, как спаи, неслитины, газовые раковины, образующиеся в период заполнения литейной формы жидким металлом. Основная причина их образования — движение расплава по каналам литейной формы с непрерывно изменяющейся (возрастающей) скоростью по мере удаления потока от центрального стояка (оси вращения).

При движении потока жидкого металла с увеличивающейся скоростью по рабочей полости формы поток разделяется на множество отдельных струй; при наличии местных сопротивлений

(повороты, внезапное расширение и сужение канала и др.) в потоке возникают завихрения. Эти негативные процессы выступают причиной образования указанных выше дефектов. Поэтому при разработке технологического процесса литья титановых отливок следует стремиться к тому, чтобы жидкий металл двигался по каналам и полостям литейной формы в виде компактного, не распадающегося на отдельные струи потока. Для обеспечения полного заполнения рабочей полости формы следует выдерживать скорость движения жидкого металла довольно высокой.

Характер движения жидкого металла, а также его скорость при центробежном литье зависят от частоты вращения центробежного стола, расстояния сечения отливки от оси вращения и от направления в контейнере канала с движущимся по нему металлом относительно оси вращения (рис. 9.8). Движение металла в виде компактного потока без его разрыва и образования отдельных струй осуществляется только в направлениях осей X , Y и Z . Во всех остальных случаях линейная скорость потока по мере движения непрерывно возрастает, что является основной причиной разрушения компактного потока на отдельные струи. В связи с этим литейные формы, предназначенные для изготовления протяженных, тонкостенных отливок, обычно располагают в заливочном контейнере таким образом, чтобы основные протяженные полости формы ориентировались по осям Y или Z . Движение металла в этом направлении осуществляется с высокой скоростью в виде компактного потока. Движение металла по каналам формы в направлении оси $-X$ создает наилучшие условия для формирования компактного потока.

В табл. 9.1 приведена расчетная зависимость скорости движения жидкого металла v от ориентации отливки относительно оси вращения, числа оборотов центробежного стола n и расстояния рассматриваемого сечения отливки от оси вращения r .

Таблица 9.1. Зависимость v от r и n

r , м	0,25	0,5	0,25	0,5
n , об/мин	200	200	300	300
v , м/с:				
$-X$	1,5	3,30	3,00	5,10
Y	0,030	0,018	0,030	0,020
Z	2,80	5,20	7,90	11,00

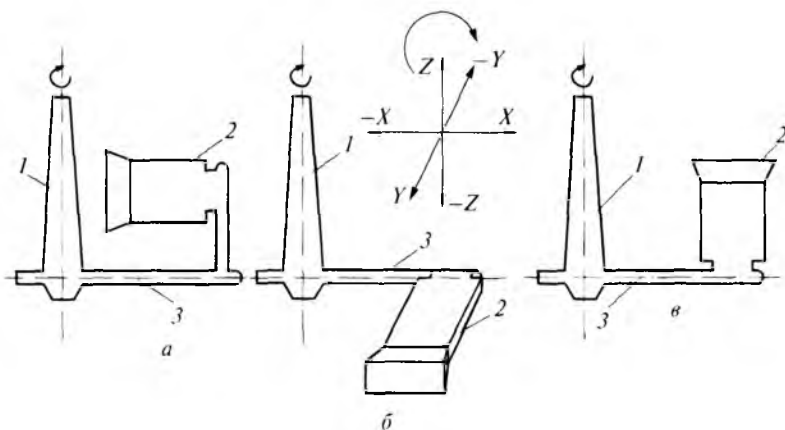


Рис. 9.8. Основные варианты расположения отливок относительно оси центрального стояка (оси вращения контейнера):

1 — центральный стояк; 2 — отливка; 3 — литниковый ход; а — направление $-X$; б — направление Y ; в — направление Z

Заполнение полости литейной формы расплавом в условиях центробежного литья носит сложный характер. Режим течения расплава в период заполнения изменяется. В качестве примера рассмотрим движение металла по каналам литейной формы, направление которого совпадает с осью $-X$. Можно выделить четыре характерные стадии (рис. 9.9).

На стадии I расплав движется по литниковому ходу в направлении $+X$. Скорость движения расплава в литниковом ходе v , м/с, определяется по уравнению

$$v = f \sqrt{\omega^2 r^2 + 2qh_1}, \quad (9.1)$$

где h_1 — высота металла в центральном стояке, м; ω — угловая скорость вращения, рад/с; r — расстояние головной части потока расплава от оси вращения, м; f — коэффициент скорости ($K \leq 1$).

Из (9.1) следует, что по мере удаления головной части потока от оси вращения его скорость возрастает, из-за чего нарушается компактность потока жидкого металла. По этой причине нельзя располагать отливки в направлении $+X$, так как из-за разбрызгивания и разделения потока на отдельные струи возникают условия для образования газовых раковин и других дефектов в металле отливок.

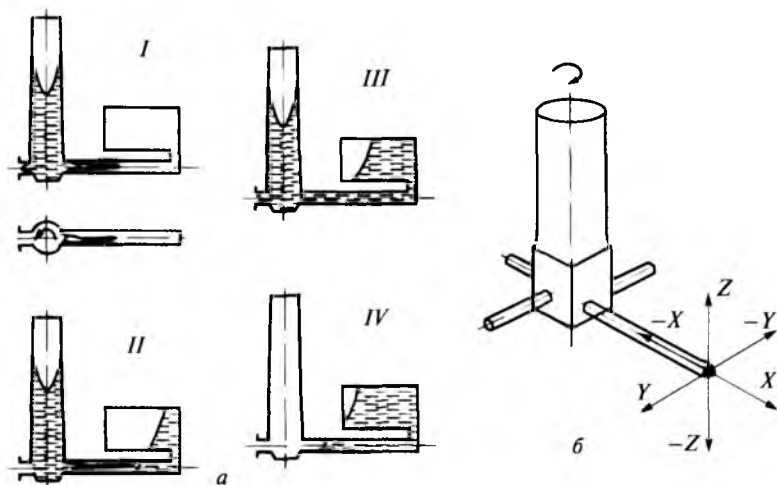


Рис. 9.9. Четыре стадии (I–IV) заполнения в литниковой системе и рабочей полости литейной формы (а) и направления движения расплава (б)

Стадия II заполнения начинается, когда головная часть потока достигает периферии полости формы и образуется свободная поверхность расплава, движущаяся в направлении оси вращения. На этой стадии движение жидкого металла в рабочей части литейной формы носит безнапорный характер. Скорость перемещения свободной поверхности определяется не ее положением относительно оси вращения, а расходом металла, поступающего из центрального стояка в литниковый ход:

$$v_2 = \mu \frac{S_{\text{л}}}{0,5S_{\text{л}} + S_0} \sqrt{\omega^2 r_0^2 + 2qh_1},$$

где $S_{\text{л}}$ и S_0 — площадь сечения соответственно литникового отверстия в центральном стояке и отливки, м²; r_0 — расстояние от оси вращения до свободной поверхности расплава в рабочей части отливки, м; $\mu \approx 0,6$ — коэффициент расхода, м.

В момент исчезновения свободной поверхности в литниковом ходе стадия II завершается.

На стадии III движение металла становится напорным. Металлопровод — все каналы литниковой системы — работает как единая гидродинамическая система. Скорость движения металла

в рабочей полости литейной формы (v_3 , м/с) изменяется и становится зависимой от радиуса вращения свободной поверхности:

$$v_3 = \mu \sqrt{\omega^2 r_0^2 + 2gh_2},$$

где h_2 — высота металла в центральном стояке под уровнем металла в рабочей части литейной формы, м.

На стадии IV свободная поверхность расплава переходит из центрального стояка в литниковый ход, т.е. $h_1 = 0$. С целью сокращения затрат металла на литниковую систему процесс заполнения необходимо проектировать так, чтобы заполнение рабочей полости литниковой формы завершалось на стадии IV.

При центробежном способе литья возникают значительные давления, которые могут деформировать или разрушить литейную форму. Давление, действующее на материал литейной формы, зависит от частоты вращения контейнера и расстояния рассматриваемого сечения формы от оси вращения. Прочность современных форм, изготовленных из графитовых и других формовочных смесей, такова, что они выдерживают нагрузки, которые могут возникать при вращении контейнера радиусом до 1,5 м с частотой 200–400 об/мин.

Выбирая расположение литейной формы в контейнере, учитывают также особенности организации питания отливки металлом из прибылей в условиях центробежного литья.

Направленное затвердевание отливки и обеспечение необходимых условий для питания достигаются в том случае, если наиболее массивные ее части располагаются в контейнере ближе к оси вращения. На массивные части обычно устанавливают прибыли так, чтобы они находились по отношению к питаемому узлу со стороны оси вращения. Прибыли располагают горизонтально или под небольшим углом к горизонту и выполняются закрытыми. Конфигурация и способы установки прибылей показаны на рис. 9.10.

Наибольший диаметр прибыли $D_{пр}$ составляет 1,2–1,4 диаметра питаемого узла; высота прибыли обычно в 2 раза превышает ее диаметр.

Скорость вращения стола центробежной машины рассчитывают с учетом габаритов, толщины стенок отливок и выбранного коэффициента утяжеления. При данной скорости вращения литейная форма в контейнере должна располагаться относительно

оси вращения так, чтобы линия свободной поверхности металла (параболоида), соответствующая этой скорости, не пересекала тепло отливки и была выше нее.

Вращающаяся форма заполняется металлом направленно – от наиболее удаленных частей отливки к центру вращения. При перепаде давлений, возникающем в слое металла, неметаллические включения и газовые пузырьки всплывают и удаляются в прибыль. Повышенное давление уменьшает вероятность зарождения и развития газовых пузырьков. Вращение стола центробежной машины продолжается до полного затвердевания отливки. Извлечение форм из плавно-заливочных установок производят после охлаждения отливок до 300–350 °С.

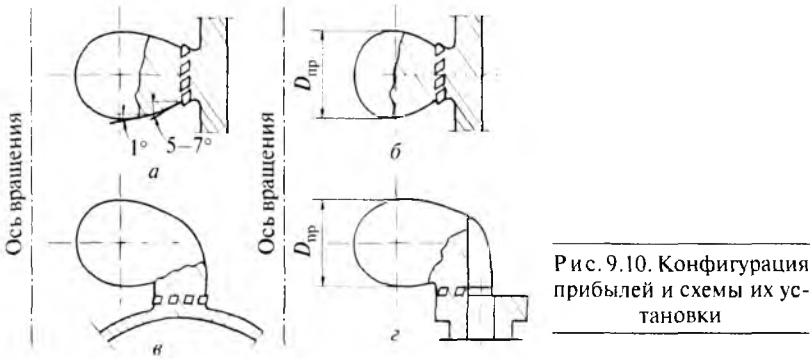


Рис. 9.10. Конфигурация прибылей и схемы их установки

Критериями оптимальности принятой технологии изготовления отливок из титановых сплавов являются их качество и удельный расход жидкого металла. Считают, что он не должен быть больше 2,5 т на 1 т годных отливок. Снижения удельного расхода достигают путем максимального наполнения контейнера формами с тем, чтобы полнее использовать массу плавки, путем применения рациональных литниковых систем, уменьшения расхода металла на разбрызгивание.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1. На какие этапы подразделяется процесс формирования отливки? Какие явления получают развитие на каждом этапе и как они влияют на качество отливок?

2. Перечислите основные требования, предъявляемые к технологическому процессу производства отливок из титановых сплавов.
3. На каком этапе формирования и почему в отливках образуются такие дефекты, как усадочная раковина, трещины, внутренние литейные напряжения?
4. Перечислите достоинства и недостатки центробежного способа заполнения расплавом литых форм.
5. Укажите расположение элементов литниковой системы и литейных форм.
6. Назовите способы увеличения скорости движения расплава по каналам формы при стационарном способе литья.
7. Из каких элементов состоит литниковая система для центробежного способа литья титановых сплавов?

ГЛАВА 10 МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ХИМИЧЕСКОЙ ИНЕРТНОСТИ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

10.1. Физико-химическое взаимодействие отливки с формой

Литейные формы для литья отливок из титановых сплавов характеризуются недостаточной химической инертностью. В результате на этапе затвердевания и охлаждения металла между отливкой и формой получают развитие физико-химические процессы, которые приводят к увеличению содержания вредных примесей (кислорода, азота, водорода, углерода и др.) в металле отливки, особенно в ее поверхностном слое.

Примеси увеличивают твердость, прочность металла и резко снижают его пластические характеристики. Так, значительно снижается предел усталости, заметно ухудшаются эксплуатационные характеристики литых деталей. В большинстве случаев повышенное содержание примесей в металле не позволяет использовать для повторной переплавки литейные отходы, так как примеси, за исключением водорода, не удаляются из металла при его расплавлении.

Поэтому одной из основных проблем фасонного литья титановых отливок является разработка технологических мероприятий, способствующих повышению инертности литейных форм.

В процессе охлаждения металла на границе отливка–форма протекают химические реакции взаимодействия титана с твердыми (конденсированными) составляющими литейной формы (графит, кокс, электрокорунд и т.д.) и с газообразными продуктами, выделяющимися из формы в результате нагрева ее под действием теплоты отливки.

Для изготовления литейных форм применяют два вида формовочных смесей — на основе порошка графита и на основе огне-

упорных оксидов Al_2O_3 , MgO , Zr_2O_2 и др. В качестве связующего в графитовый порошок вводят синтетические смолы (см. гл. 8), которые в процессе обжига изготовленных из графитовой формовочной смеси форм превращаются в полукокс или кокс. В формовочные смеси на основе порошков оксидов как связующее используют этилсиликат $(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4\text{Si}$, в процессе обжига превращающийся в диоксид кремния SiO_2 .

Таким образом, графитовая литейная форма перед ее заполнением расплавом состоит из углерода и небольшого количества радикалов OH , входящих в состав полукокса, а керамическая — из огнеупорного оксида (Al_2O_3 , или MgO , или ZrO_2 и т.д.) и связующего SiO_2 .

С момента поступления жидкого металла в полость литейной формы ее температура на границе с металлом резко возрастает до $1200\text{--}1600^\circ\text{C}$, что приводит к выделению газообразных продуктов в зазор между отливкой и формой. Количество выделяющихся газов зависит от химического состава материала формы и параметров ряда технологических операций на этапе изготовления и подготовки форм к заливке.

Отметим, что графитококсовые формы обладают значительно большей газотворностью, чем оксидные.

Выделяющиеся из формы в период формирования отливки газы, а также конденсированные составляющие материала формы (графит, оксиды) вступают в физико-химическое взаимодействие с титаном, приводя к образованию в отливках таких дефектов, как загрязненный примесями поверхностный слой отливки, пригар, газовые раковины, микротрещины в поверхностном слое, повышение общего содержания примесей в металле, что не позволяет использовать в полном объеме данный металл для повторной переплавки. Поэтому разработка и применение технологических мероприятий, направленных на повышение химической инертности литейных форм, весьма актуальны для литья отливок из титановых сплавов.

Интенсивность физико-химического взаимодействия титановых сплавов с конденсированным материалом литейной формы и газами, выделяющимися из нее, в значительной мере определяются температурой и агрегатным состоянием металла, контактирующего с литейной формой.

На рис. 10.1 представлена зависимость температуры поверхностного слоя графитовой литейной формы, изготовленной из формовочной смеси СФТ-1П, от времени контакта жидкого металла с формой в период ее заполнения расплавом. В данном случае характерный размер изготавливаемой плоской отливки составлял $X_1 = 2$ см. Из рис. 10.1 следует, что через 1–2 с после начала заполнения формы расплавом температура поверхности формы достигает 1200–1600 °С. С повышением температуры литья возрастает температура поверхностного слоя формы, а при литье титанового сплава с перегревом выше температуры кристаллизации на 150 °С температура поверхности достигает 1660–1670 °С (кривая 3).

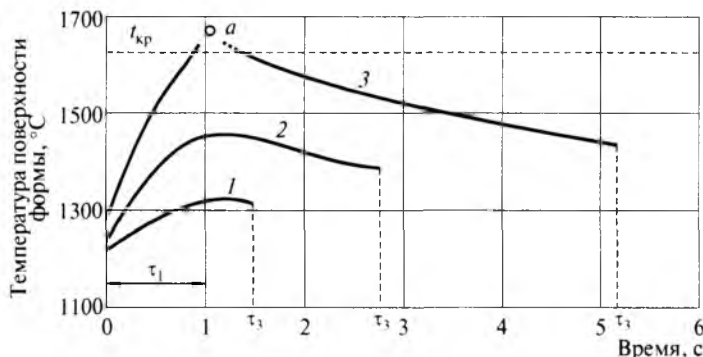


Рис. 10.1. Зависимость температуры поверхности формы в период ее заполнения расплавом от температуры литья (сплав ВТ5Л):

1 — 1700 °С; 2 — 1750 °С; 3 — 1800 °С

При анализе физико-химических процессов, развивающихся на границе металл–форма, следует учитывать особенности кинетики затвердевания отливок из титановых сплавов, которые связаны с низким значением коэффициента теплопроводности титана и с интенсивным отводом теплоты от металла в стенки литейной формы.

На рис. 10.2 представлена схема, иллюстрирующая развитие процесса затвердевания титанового сплава на этапе заполнения литейной формы расплавом.

В начальный период заполнения формы (менее 1 с) на поверхности жидкого металла, соприкасающегося со стенками формы, в ее сечении А–А практически мгновенно образуется слой затвердевшего металла (рис. 10.2, а). С увеличением времени течения

металла через рассматриваемое сечение литейной формы возможны следующие два варианта кинетики изменения толщины первоначально образовавшегося слоя затвердевшего металла.

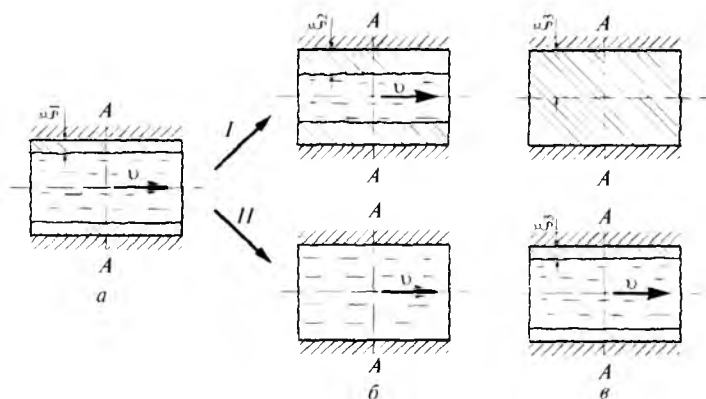


Рис. 10.2. Варианты (I и II) кинетики затвердевания металла на этапе заполнения литейной формы:

τ — время заполнения ($\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$); ξ — толщина затвердевшего слоя металла

Первый вариант (по стрелке I, рис. 10.2, б). Толщина образовавшегося слоя затвердевшего металла непрерывно возрастает вплоть до полного затвердевания металла в рассматриваемом сечении А—А. Подобная кинетика затвердевания металла характерна для следующих случаев литья:

- ◇ невысокая температура литья жидкого металла;
- ◇ масса жидкого металла, протекающего через данное сечение в период заполнения формы, относительно невелика.

Второй вариант (по стрелке II на рис. 10.2, в). Первоначально образовавшаяся корка затвердевшего металла расплавляется, а после остановки потока жидкого металла (форма полностью заполняется расплавом) вновь образуется слой затвердевшего металла ξ_3 (рис. 10.2, в), толщина которого непрерывно возрастает вплоть до полного затвердевания металла в сечении А—А отливки. Этот вариант кинетики затвердевания металла в период заполнения наблюдается в следующих случаях:

- ◇ высокая температура литья;
- ◇ масса жидкого металла, протекающего через сечение А—А в период заполнения, значительна, что приводит к расплавлению первоначально образовавшегося слоя затвердевшего металла.

На рис. 10.3 представлены результаты экспериментальных исследований, показывающих изменение толщины затвердевшего слоя сплава ВТ5Л при течении расплава по каналу литейной графитовой формы радиусом 2 см в зависимости от времени. Если температура литья была невысокой (кривые 1 и 2 на рис. 10.1), процесс затвердевания металла развивается по варианту I (рис. 10.2). В случае литья с относительно высокой температурой расплава (кривая 3 на рис. 10.1) через короткий отрезок времени $\tau_{пл}$ первоначально образовавшаяся корка металла расплавляется и жидкий металл вступает в непосредственный контакт с поверхностью литейной формы, которая к данному моменту имеет высокую температуру (см. рис. 10.1). После полного заполнения литейной формы расплавом вновь образуется слой затвердевшего металла, толщина которого непрерывно возрастает (вариант II на рис. 10.2).

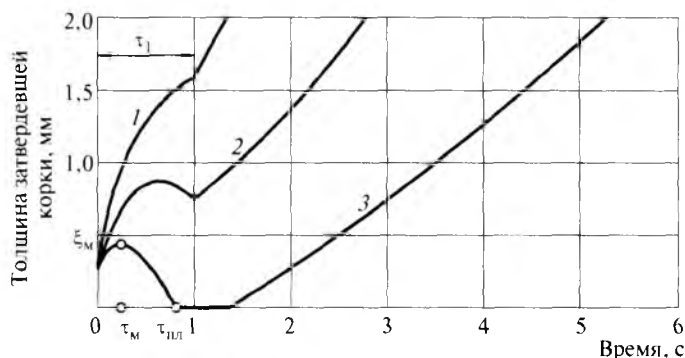


Рис. 10.3. Кинетика затвердевания сплава ВТ5Л в канале графитовой формы радиусом 2 см в зависимости от температуры литья:

1 – 1700 °C; 2 – 1750 °C; 3 – 1800 °C

Если развивается II вариант кинетики затвердевания металла, происходит интенсивное физико-химическое взаимодействие металла с материалом формы, что вызывает образование дефектов в отливках (пригар, сильное насыщение металла примесями, газовые раковины и др.), которые в большинстве случаев резко ухудшают эксплуатационные характеристики литых деталей. Наивысшая интенсивность химико-физического взаимодействия между металлом и материалом формы наблюдается в период непосредственного контакта жидкого металла с материалом литейной фор-

мы, поверхностный слой которой к этому периоду нагревается до высокой температуры (см. рис. 10.1, кривая 3).

В зависимости от воздействия внешних сил (центробежные силы, металлостатический напор, усадочные явления и др.) затвердевшая корка может быть плотно прижатой к поверхности литейной формы либо между коркой и формой образуется зазор.

На рис. 10.4 представлена схема, иллюстрирующая возможные варианты контакта поверхностного слоя металла отливки с формой. При формировании поверхностного слоя отливки между отливкой и формой образуется зазор (рис. 10.4, а) и под действием высокой температуры из формы выделяются газообразные продукты вследствие десорбции газов, разложения и испарения соединений и элементов, входящих в состав формы.

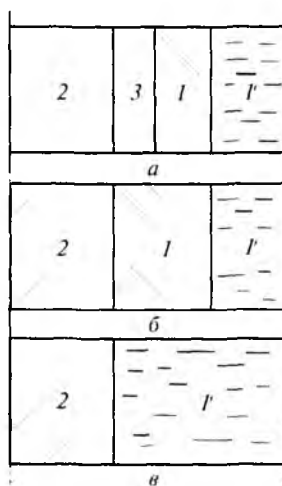


Рис. 10.4. Возможные варианты контакта формы с металлом отливки:

1 – твердый металл; 1' – жидкий металл; 2 – форма; 3 – зазор

При температурах более 1200 °С титан и его сплавы чрезвычайно активно и с высокой скоростью взаимодействуют с газами. Продукты взаимодействия интенсивно диффундируют от поверхности взаимодействия в глубь отливки и растворяются в металле, и в отливке образуется загрязненный поверхностный слой. Растворение элементов в титане сопровождается ухудшением пластичности металла, повышением твердости и предела прочности.

Толщина загрязненного поверхностного слоя определяется количеством газа, выделяющегося из формы в зазор, скоростью

химической реакции, скоростью диффузии и временем контакта отливки с формой.

Для данного случая изменение парциального давления газа p в зазоре (рис. 10.4, *а*) или в слое формы, прилегающем к отливке (рис. 10.4, *б* и *в*), и изменение концентрации реагирующего элемента с титаном в поверхностном слое отливки C_n будет соответствовать графику на рис. 10.5.

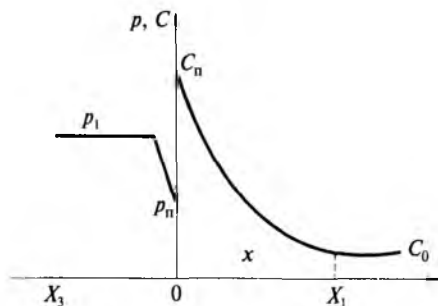


Рис. 10.5. Изменение парциального давления газов в зазоре (или в форме) и концентрации реагирующего элемента в поверхностном слое отливки

Из-за возникающего градиента газового давления реагирующий элемент перемещается к поверхности раздела. Так как скорость химической реакции (константа скорости реакции) значительно выше скорости диффузии, на поверхности титана концентрация газообразного элемента достигает высоких значений, соответствующих составу низших химических соединений, образуемых титаном с данным элементом. В связи с этим концентрация C_n на поверхности отливки в зависимости от химического элемента, реагирующего с титаном, может быть определена по соответствующим диаграммам состояния. Это позволяет использовать расчетные методы для определения зависимости количества вещества, растворяемого в металле отливки, от температуры и времени взаимодействия металла с газами, выделяющимися из формы.

В варианте на рис. 10.4, *б*, так же как и в варианте на рис. 10.4, *а*, получают развитие химические реакции между газами, выделяющимися из формы, и затвердевшим металлом. Так как в данном варианте затвердевший металл отливки непосредственно контактирует с поверхностью формы, то дополнительно развиваются физико-химические процессы между элементами и химическими соединениями, входящими в состав формы, и поверхностным

слоем отливки. Количество растворенных в поверхностном слое элементов в данном варианте взаимодействия при прочих равных условиях больше, чем в варианте на рис. 10.4, *а*. Поэтому глубина загрязненного поверхностного слоя, а также изменение свойств металла оказываются более значительными. Взаимная диффузия элементов и соединений материала формы с титаном может привести к развитию процесса спекания частиц формы с поверхностью отливки.

Количество растворенного вещества Q в поверхностном слое отливки можно приблизительно определить по уравнению

$$Q = D_3 \frac{C_{II} - C_0}{\Delta X} S_k \tau,$$

где D_3 — эффективный коэффициент диффузии; C_{II} — концентрация на поверхности отливки; C_0 — начальная концентрация; ΔX — путь диффузии; S_k — площадь поверхности контакта между реагирующими веществами; τ — время взаимодействия.

Таким образом, насыщение металла примесями в случае контакта отливки по варианту на рис. 10.2, *б* происходит за счет взаимодействия всей поверхности отливки S_0 с газообразными продуктами, выделяющимися из формы, а также взаимодействия конденсированных фаз формы и отливки, получающего развитие лишь на участках непосредственно контакта зерен графита с металлом отливки S_k (рис. 10.6).

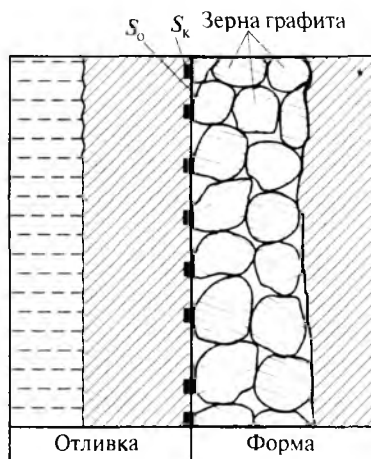


Рис. 10.6. Схема контакта поверхностей формы и отливки

Так как скорость химических реакций между конденсированным материалом формы и металлом значительно ниже, чем между металлом и газообразными продуктами, и $S_0 \gg S_k$, можно предположить, что определяющая роль в насыщении металла отливки примесями, так же как и в случае контакта по варианту на рис. 10.2, *а*, принадлежит физико-химическим процессам взаимодействия металла с газообразными продуктами, выделяющимися из формы.

В варианте на рис. 10.2, *в* непосредственный контакт жидкого металла с формой возникает в результате расплавления первоначально образовавшейся корки затвердевающего металла. Поверхность формы к моменту ее расплавления нагревается до высокой температуры, и получают развитие все физико-химические процессы, характерные для вариантов на рис. 10.2, *а* и *б*. Но так как в данном случае температура на границе контакта оказывается выше, чем в других вариантах, это приводит к значительной интенсификации всех физико-химических процессов между отливкой и формой.

Поскольку краевой угол смачивания жидким титаном различных веществ, применяемых в качестве формовочных материалов, меньше 30° , то под действием капиллярных сил жидкий расплав проникает в поры литейной формы и на поверхности отливки возникает механический пригар. Поэтому формирование титановых отливок по варианту на рис. 10.2, *в* приводит, как правило, к недопустимому загрязнению отливки посторонними элементами и образованию трудноотделимого механического пригара.

Анализ физико-химического взаимодействия отливки с формой показывает, что между отливкой и формой развиваются следующие основные процессы, загрязняющие металл примесями и ухудшающие его свойства:

- химическое взаимодействие выделяющихся из формы газов с металлом и диффузия продуктов реакции от поверхности в глубь отливки (данный процесс взаимодействия характерен для всех трех вариантов контакта отливки с формой);
- химическое взаимодействие титана с конденсированными материалами, входящими в состав литейной формы (огнеупорная основа, связующее, примеси); диффузия продуктов реакции в глубь отливки; взаимная диффузия, приводящая к спеканию частиц формы с поверхностью отливки (варианты на рис. 10.2, *б* и *в*);

- ♦ механическое проникновение жидкого металла в поры формы и образование пригара (вариант на рис. 10.2, в).

Исходные формовочные материалы и подготовленные к заливке формы должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) подготовленные к заливке формы не должны в процессе формирования отливки выделять значительное количество газообразных продуктов. Это требование может быть выполнено, если вещества, входящие в состав формы, имеют низкие упругость пара и скорость испарения. Они не должны разлагаться в условиях низкого давления и высоких температур с образованием газообразных продуктов (диссоциация, термодеструкция и т.д.) и сорбировать газы из атмосферы в период изготовления и подготовки форм к заливке;
- 2) вещества, входящие в состав формы, должны иметь минимальную склонность к взаимодействию с титаном (образование химических соединений, диффузия и растворение в титане). Растворяющиеся в титане продукты не должны оказывать существенного отрицательного влияния на свойства металла.

Так как практически нет материалов, которые удовлетворяют указанным требованиям, то инертность литейных форм может быть повышена либо за счет выбора из числа известных наиболее инертных по отношению к титану исходных формовочных материалов и за счет разработки такого технологического процесса изготовления форм и их подготовки к заливке, который обеспечит наибольшую термохимическую инертность литейных форм, либо за счет применения комбинированных литейных форм, состоящих из двух или более различающихся по составу слоев. Основная функция внутреннего (рабочего) слоя формы (защитного покрытия), непосредственно контактирующего с металлом, состоит в предотвращении или снижении интенсивности взаимодействия отливки с формой.

Эффективность мероприятий по повышению термохимической инертности литейных форм зависит от вида формовочного материала, используемого для их изготовления.

При изготовлении отливок в графитокосовых формах основные мероприятия по повышению их термохимической инертности направлены на снижение газотворной способности литейных форм, подготовленных к заливке.

В случае использования керамических форм, которые менее инертны, чем графитовые, наиболее эффективным способом повышения их инертности является нанесение на рабочую поверхность формы специальных защитных покрытий.

10.2. Повышение химической инертности графитокочковых форм

Углеродные материалы (графит, кокс, пироуглерод и др.) наиболее инертны по отношению к титану. Однако, обладая развитой микро- и макропористостью, они сорбируют большое количество газов. Газосодержание таких форм может быть значительным (рис. 10.7). Вследствие нагрева формы затвердевающим металлом происходит выделение газов из формы, что может быть причиной образования дефектов в отливке.



Анализ газов, выделяющихся из углеродных материалов, в том числе графитокочковых форм, показывает, что они состоят из азота, кислорода, оксида углерода, водорода и углеводородов. Процентное соотношение элементарных газов, выделяющихся из литейной формы, зависит от первичных свойств исходных мате-

риалов, технологического процесса изготовления формы и температуры ее нагрева при затвердевании отливки.

Количество выделяющихся из формы газов определяется технологическим свойством формы — газотворностью. При нагреве графитоккоксовых форм в вакууме до 2000–2500 °С из них выделяются все газы и в данном случае газотворность равна газосодержанию. При нагреве графитоккоксовых форм в процессе затвердевания отливок выделяются газы, сорбированные материалом формы, и газы, образующиеся в результате термодеструкции связующего вещества.

Газотворность, по классификации П.П. Берга, является вторичным свойством форм и зависит как от первичных свойств формы (химического состава исходных материалов и их соотношения в формовочной смеси, зернового строения огнеупорного наполнителя и т.д.), так и от технологического процесса изготовления и подготовки формы к заливке.

Рассматривая последовательно операции технологического процесса изготовления графитоккоксовых форм и их подготовки к заливке с точки зрения их влияния на газотворность форм и соответственно на их термохимическую стойкость, можно выделить следующие основные этапы: 1) приготовление формовочной смеси и изготовление литейной формы; 2) тепловую обработку форм (сушку и обжиг); 3) сборку форм, их контроль и хранение до заливки; 4) вакуумирование форм перед заливкой. Каждый из этих этапов оказывает значительное влияние на свойства формы, в том числе на ее газосодержание и газотворность.

Механически обработанный или блочный графит имеет невысокое газосодержание, поэтому при нагреве до высоких температур из него выделяется относительно немного газов (см. табл. 10.1). Удельная поверхность графитового порошка, используемого для изготовления литейных форм, значительно выше, чем у монолитного графита. Механическая операция приготовления графитового порошка способствует развитию в нем трещин, росту его пористости. Все это существенно увеличивает сорбционную способность порошка графита. Данные табл. 10.1 показывают, что при нагреве порошка графита до 1000 °С из него выделяется в 8 раз больше газов, чем из блочного графита, и в 12 раз — после предварительного обжига при 1000 °С в вакууме. Обжиг способствует

снижению газотворности блочного графита в 2 раза, а графитового порошка — на 30 %.

Таблица 10.1. Газотворность блочного графита и графитового порошка

Состояние материала	Газотворность при 1000 °С, см ³ /г	
	Блочный графит ГМЗ	Графитовый порошок
Исходное	0,12–0,14	1,02–1,05
После обжига при 1000 °С в вакууме и последующего хранения в сухом воздухе в течение 2 дней	0,05–0,06	0,71–0,72

Применяемые для изготовления литейных форм органические связующие (синтетические смолы) в процессе сушки и обжига превращаются в прочные углеродистые образования (кокс, полукокс), которые связывают зерна огнеупорного наполнителя. В результате образуются либо графитококсовые формы, если огнеупорный материал — порошок графита, либо коксовые, если в качестве наполнителя использовали кокс. Количество образующегося кокса в процессе обжига зависит от природы используемого связующего (степени его карбонизации), количества вводимого связующего и режима обжига форм.

Так как кокс — материал с сильно развитой микро- и макропористостью, он способен сорбировать значительно больше газов, чем графит. В процессе обжига литейных форм при 800–1000 °С образующиеся из связующего кокс и полукокс содержат довольно много (до 8 %) летучих веществ. При заливке металла поверхностные слои формы нагреваются до высоких температур, поэтому из формы выделяется значительное количество газообразных продуктов.

В зависимости от способа изготовления формы и гранулометрического состава наполнителя в формовочную смесь вводят различное количество связующего. В ходе исследования образцов из графитового порошка, применяемого для формовочной смеси СФТ-1П, установлена зависимость газотворности обожженных форм от доли вводимого связующего (рис. 10.8). Образцы прессовали под давлением 3,0 МПа, подвергали обжигу при 1000–1100 °С в вакууме и после обжига 48 ч выдерживали в атмосфере сухого

воздуха ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p = 0,1\text{ МПа}$), а затем в установке нагревали до заданной температуры с целью определения газотворности.

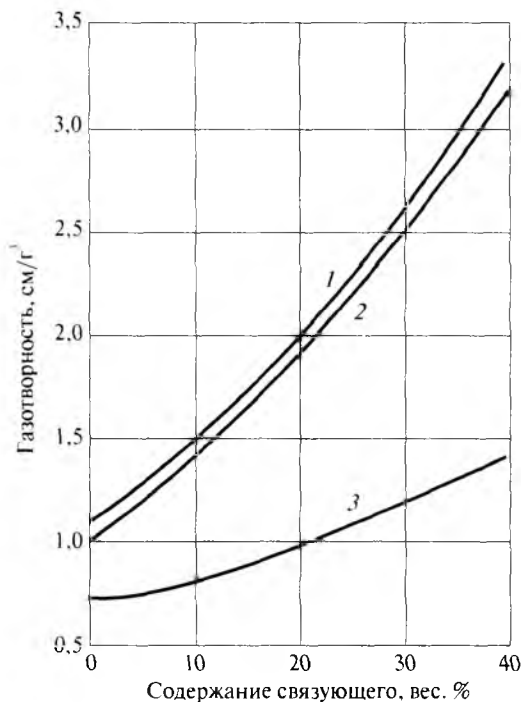


Рис. 10.8. Зависимость газотворности q образцов из графитовой смеси от количества связующего при температуре:

1 – 2000 °C; 2 – 1500 °C;
3 – 1000 °C

Газотворность образцов при 1500–2000 °C (кривые 1, 2 на рис. 10.8) резко возрастала с увеличением количества вводимого связующего, что обусловлено процессом термодеструкции образовавшегося при обжиге кокса и полукокса и выделением газов, сорбированных образцами в период их хранения. Так как при 1000 °C процесс термодеструкции практически не развивался (образцы предварительно обжигали в вакууме при 1000–1100 °C), то рост газотворности образцов с увеличением количества вводимого связующего (кривая 3 на рис. 10.8) при данной температуре был вызван выделением лишь сорбированных газов.

Можно сказать, что высокая газотворность форм при 1500–2000 °C обусловлена в основном процессом термодеструкции кокса. Снижение количества связующего вещества, вводимого в формовочные смеси, приводит к уменьшению газотворности

обоженных при 1000–1100 °С литейных графитокочковых форм. Аналогичные результаты получены при анализе газотворности промышленных литейных форм, обоженных в восстановительной атмосфере при 1000–1100 °С.

Наибольшее количество связующего вещества содержится в графитовых формах, изготавливаемых по выплавляемым моделям (до 130 ч (по массе) на 100 ч (по массе) графитового порошка), а наименьшее — в прессованных графитовых формах. В оболочковых графитовых формах содержание пульвербакелита составляет 25–30 ч (по массе). Вследствие этого наибольшей газотворностью обладают графитовые формы, изготавливаемые по выплавляемым моделям, а наименьшей — прессованные формы. В табл. 10.2 приведены данные о газотворности промышленных графитовых форм, обоженных в восстановительной атмосфере при 1000–1100 °С.

Таблица 10.2. Газотворность промышленных графитовых форм q , см³/г

Температура, °С	1000	1500
Формы, прессованные из смеси СФТ-1П	2,00–2,15	3,20–3,40
Формы набивные из смеси СФТ-1	2,10–2,25	3,30–3,50
Формы оболочковые из смеси СГО-3	3,05–3,25	4,70–5,00
Формы по выплавляемым моделям	4,60–4,90	7,00–7,50

Газотворность графитокочковых литейных форм в 50–100 раз превосходит газотворность блочного графита.

В технологическом процессе изготовления углеграфитовых материалов применяют различные режимы обжига, которые существенно влияют на их свойства, в частности на реакционную способность и газотворность. В практике фасонного литья титановых сплавов наибольшее распространение получил режим, при котором в результате ступенчатого нагрева достигается максимальная температура, равная 1000–1100 °С. В ряде случаев обжиг завершают при 1800–2000 °С, что способствует повышению качества титановых отливок.

Инертность графитовых форм зависит также от среды обжига (табл. 10.3). Широко применяется обжиг в восстановительной (автогенерируемой) атмосфере, т.е. в среде выделяющихся

из формы газов. При изготовлении ответственных отливок обжиг форм производят в вакууме. Кроме того, применяют комбинированные режимы обжига (например, сначала в восстановительной атмосфере, затем в вакууме), в некоторых случаях формы дважды подвергают тепловой обработке в одной и той же атмосфере.

Газотворность обожженных форм в значительной мере определяется температурой, средой и временем выдержки форм при максимальной температуре обжига. Так, завершение обжига при 800–1000 °С приводит к образованию из связующего вещества полукокса и кокса, структура которых не вполне упорядочена и содержит значительное количество атомов кислорода и водорода. Обжиг при более высоких температурах (1500–2000 °С) обуславливает упорядочение структуры кокса и одновременное удаление кислорода и водорода. При этом происходит постепенный переход от структуры кокса к структуре более устойчивой — графиту. Этим объясняется низкая газотворность форм, прошедших обжиг при высоких температурах.

Влияние температуры обжига на газотворность образцов, изготовленных из формовочной смеси СФТ-1П, показано на рис. 10.9, *а*, влияние продолжительности обжига — на рис. 10.9, *б*. Обжиг проводился при давлении 0,133 Па. Результаты исследований, характеризующие влияние среды обжига на газотворность образцов из смеси СФТ-1П, представлены в табл. 10.3. Обжиг при 1500–1800 °С снижает газотворность форм по сравнению с обжигом при 1000–1100 °С примерно в 2,0–2,5 раза. При обжиге форм в вакууме газотворность еще в 1,4–1,5 раза ниже, чем в восстановительной атмосфере. Время выдержки форм при максимальной температуре обжига выбирают в пределах 4–6 ч (рис. 10.9, *б*).

Существующий технологический процесс подготовки форм к заливке предполагает контакт обожженных форм с атмосферой воздуха перед их заливкой расплавом. После обжига контролируют качество полуформ и стержней, затем производят их сборку и установку в заливочные контейнеры. Время от выгрузки форм из обжиговых печей до заливки составляет 0,5 суток и более. Поскольку графит по своей природе является активным сорбентом, то в этот период возрастает газосодержание графитокочковых литейных форм.

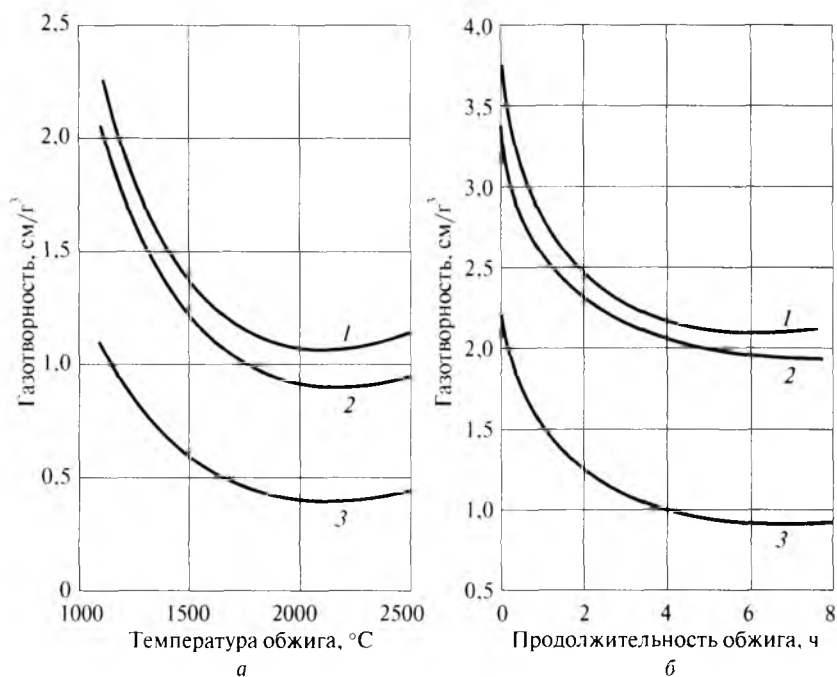


Рис. 10.9. Зависимость газотворности q образцов из смеси СФТ-1П от температуры обжига (a) и продолжительности обжига (b) при разных температурах:
1 – 2000 °C; 2 – 1500 °C; 3 – 1000 °C

Таблица 10.3. Влияние среды обжига на газотворность образцов из смеси СФТ-1П ($t_{\text{обж}} = 1100$ °C)

Среда обжига	Газотворность, см ³ /г, при t , °C		
	1000	1500	2000
Вакуум	0,90–1,0	2,05–2,20	2,24–2,25
Восстановительная	2,00–2,10	3,30–3,45	3,40–3,65
Аргон	1,50–1,16	3,05–3,25	3,20–3,40
Смесь аргона с хлором	1,44–1,46	3,00–3,15	3,10–3,30

Основное влияние на сорбцию газов обожженными литейными формами оказывают:

химический и гранулометрический составы исходных материалов;

- ♦ особенности технологического процесса изготовления форм — способ изготовления, режим сушки и обжига и т.д.;
- ♦ условия хранения обожженных форм.

В ходе исследования, проведенного на сорбционной установке объемным методом, основных закономерностей поглощения литейными графитовыми формами газов из атмосферы в период их подготовки к заливке изготовленные прессованием формовочной смеси СФТ-1П образцы подвергали сушке и вакуумному обжигу при 1100 °С, выдерживали определенное время в атмосфере воздуха с заданными параметрами, после чего определяли объем поглощенных газов.

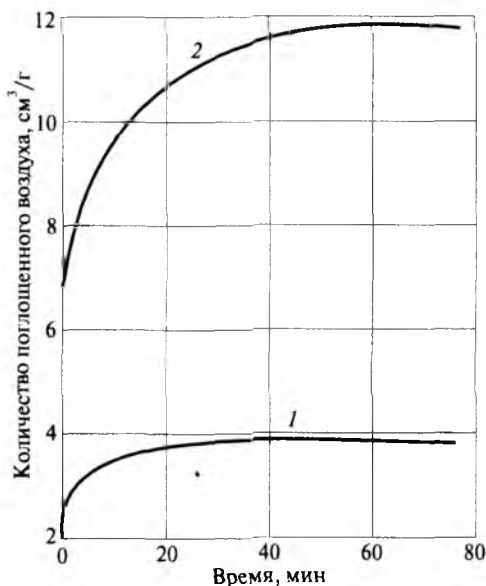


Рис. 10.10. Кинетика поглощения сухого (кривая 1) и влажного (кривая 2) воздуха образцами из смеси СФТ-1П при 20 °С и давлении $p = 0,1$ МПа

На рис. 10.10 представлены данные, характеризующие кинетику поглощения графитовыми формами влажного (относительная влажность 60 %) и сухого воздуха, откуда следует, что сорбционная способность в сухом воздухе существенно ниже, чем в атмосфере влажного. Высокая скорость сорбции наблюдается в начальные моменты контакта образцов с атмосферой. С течением

времени количество поглощенного сухого воздуха возрастает, и через 24 ч образцы сорбируют $4 \text{ см}^3/\text{г}$ сухого воздуха, а через 60 дней — $5 \text{ см}^3/\text{г}$.

С уменьшением давления сорбция воздуха графитококсовыми образцами непрерывно снижается (рис. 10.11). Количество поглощаемого образцами влажного и сухого воздуха (относительная влажность 60 %) при низких давлениях (50–300 ГПа) примерно одинаково.

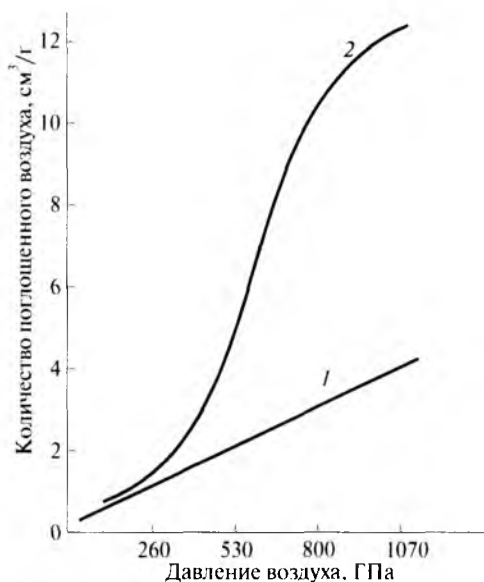


Рис. 10.11. Зависимость сорбции сухого (прямая 1) и влажного (кривая 2) воздуха образцами из смеси СФТ-1П от давления p при 20°C

В случае хранения обожженных образцов в атмосфере воздуха при низких давлениях (менее 13,0 Па) количество поглощаемого воздуха ничтожно мало, а при нагреве их до $200\text{--}400^\circ\text{C}$ образцы практически не сорбируют газы (рис. 10.12).

Таким образом, после обжига литейные формы сорбируют газы. Однако перед заливкой формы некоторое время (до 1 ч) находятся в камере плавления-заливочной установки при давлении 0,13–1,33 Па и, естественно, часть газов из формы удаляется. В первую очередь из графитококсовых форм удаляются газы со слабыми связями — физически сорбированные газы.

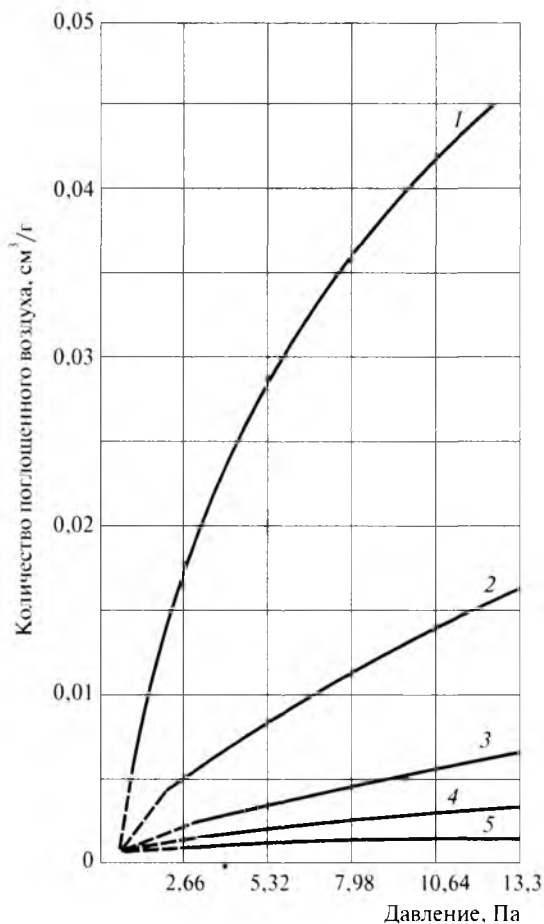


Рис. 10.12. Изотермы поглощения сухого воздуха образцами из смеси СФТ-1П при температуре:

1 – 20 °C; 2 – 100 °C; 3 – 200 °C; 4 – 300 °C; 5 – 400 °C

Соотношение количества газов, физически сорбированных формой в период ее хранения, и хемосорбированных газов, зависит от свойств исходных материалов, пористости, соотношения графита и кокса, режима обжига и т.д. Поэтому нет прямой зависимости между количеством поглощенных формой газов в период ее хранения и газотворностью формы.

Условия хранения графитококсовых форм после обжига в различных средах также оказывают существенное влияние на газотворность форм, в первую очередь продолжительность нахождения форм в атмосфере воздуха, влажность и температура воздуха.

На рис. 10.13 показано влияние продолжительности нахождения графитококсовых образцов в атмосфере сухого воздуха на их газотворность. Наиболее интенсивно газотворность возрастает в первые 5–10 дней хранения форм на воздухе, после чего остается практически неизменной.

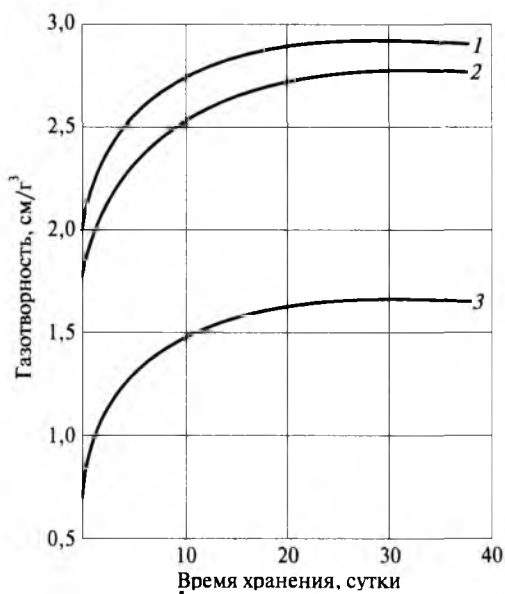


Рис. 10.13. Зависимость газотворности q образцов из смеси СФТ-1П от времени хранения t в сухом воздухе при температуре:

1 — 2000 °C; 2 — 1500 °C; 3 — 1000 °C

Повышение влажности воздуха, в атмосфере которого производится хранение графитовых форм после обжига, значительно увеличивает их газотворность (рис. 10.14). Так, газотворность образцов, хранившихся 48 ч на воздухе с относительной влажностью 90 %, в 1,5–2 раза превышает газотворность образцов, хранившихся такое же время на сухом воздухе.

С целью снижения интенсивности взаимодействия графитовых форм с атмосферой воздуха иногда практикуют их хранение в

сушильных шкафах при 200–300 °С. Это может оказывать двоякое воздействие на газосодержание форм. Как следует из общей теории сорбции, повышение температуры среды неизбежно должно привести, с одной стороны, к снижению количества газов, поглощаемых графитовыми формами физическим путем (физическая адсорбция), а с другой – к интенсификации процесса хемосорбции. При хранении обожженных графитовых форм в сушильных шкафах значительно повышается их газотворность (табл. 10.4). Поэтому нежелательно хранение графитовых форм после вакуумного обжига при 200–300 °С. Оптимальной температурой хранения данных форм после обжига следует считать 100 °С. При этом газосодержание графитовых форм, хранившихся после обжига в сушильных шкафах при 100 °С и в атмосфере сухого воздуха при 20 °С, становится соизмеримым.

Таблица 10.4. Изменение газотворности графитовых форм при хранении в сушильных шкафах

Газотворность, см ³ /г	Температура, °С	
	1000	1500
При хранении в сухом воздухе при t , °С:		
20	1,00–1,10	2,00–2,15
100	1,15–1,25	2,20–2,40
200	1,30–1,50	2,50–2,70
300	2,0–2,05	3,45–3,55
Во влажном воздухе (90 %) при 20 °С	2,0–2,05	3,35–3,4

Литейные формы, как указывалось выше, перед заливкой помещаются в плавно-заливочную камеру, где они в течение 10–60 мин вакуумируются, так как газотворность образцов из смеси СФТ-1П зависит от глубины вакуума в период их дегазации (рис. 10.15). Так, вакуумирование литейных форм в камере плавно-заливочной установки при давлении не выше 1,0 Па значительно снижает их газотворность. При повышении давления заметного снижения газосодержания не происходит.

Таким образом, газотворность и соответственно термохимическая инертность графитокочковых форм зависят от параметров

технологического процесса подготовки форм к заливке, и их выбор определяется требованиями, предъявляемыми к литой детали, которые в большинстве случаев зависят от условий их работы. По этому признаку литые детали могут быть условно разбиты на три группы:

- 1) высоконагруженные, особо ответственные детали, работающие при знакопеременных нагрузках;
- 2) детали, работающие при средней и малой нагруженности;
- 3) корпусные и прочие детали общего назначения, не несущие значительных силовых нагрузок (например, многие детали, от которых требуется высокая коррозионная стойкость, и др.).

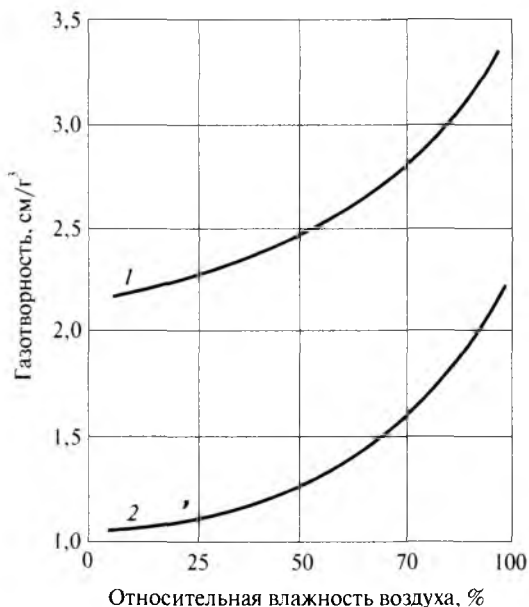


Рис. 10.14. Зависимость газотворности q образцов из смеси СФТ-1П от относительной влажности воздуха ψ в период хранения при температуре:

1 — 1500 °C; 2 — 1000 °C

При выборе технологического режима подготовки форм к заливке также учитывают их газотворность. На основании этого для изготовления литых деталей первой группы можно рекомендовать такие режимы, которые бы обеспечивали наиболее низкую газотворность (менее 1,5 $\text{см}^3/\text{г}$) графитококсовых форм при

1200–1500 °С (до таких температур нагреваются поверхностные слои форм при литье титановых сплавов); для деталей второй группы рекомендуются режимы, обеспечивающие газотворность форм в пределах 1,5–3,0 см³/г; для деталей третьей группы 3,0–6,0 см³/г.

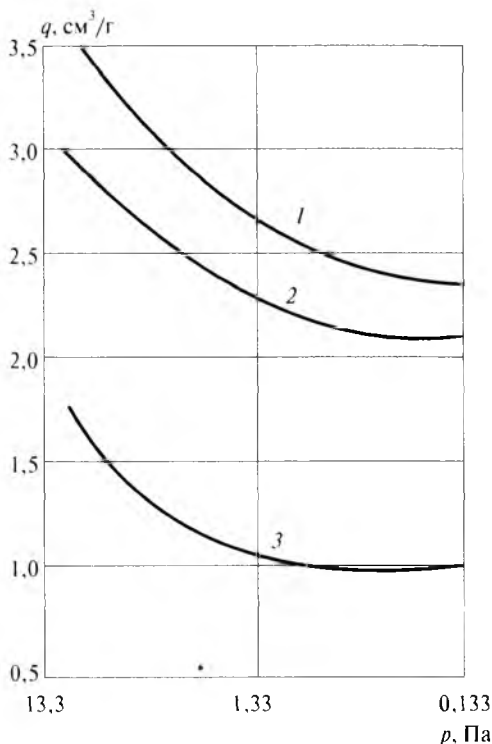


Рис. 10.15. Зависимость газотворности q образцов из смеси СФТ-1П от давления p в период дегазации при температуре:

1 – 2000 °С; 2 – 1500 °С; 3 – 1000 °С

Технологический режим можно выбрать по номограммам, представленным на рис. 10.16. Номограммы позволяют определить газотворность графитовых набивных и прессованных форм, прошедших обжиг в вакууме (рис. 10.16, а) и в восстановительной атмосфере (рис. 10.16, б) в зависимости от технологии их подготовки — температуры и продолжительности обжига, длительности хранения и влажности воздуха.

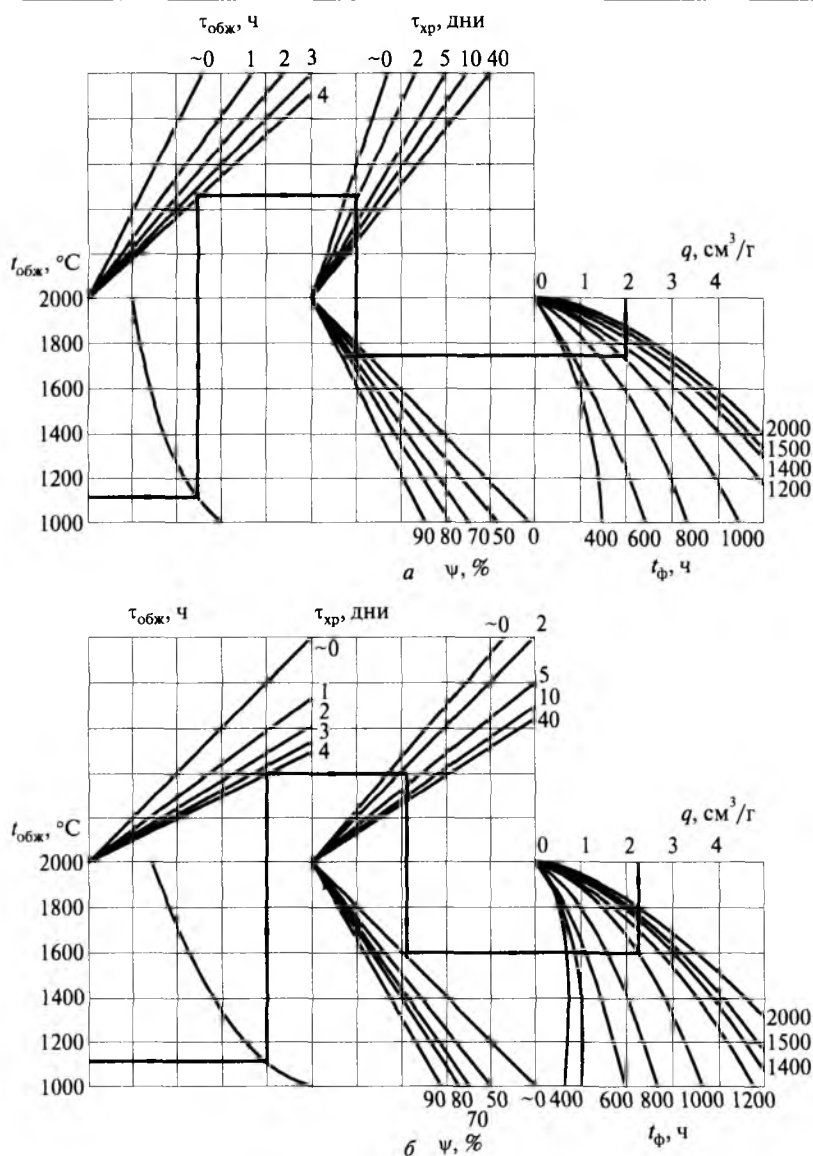


Рис. 10.16. Номограмма для определения газотворности q графитовых форм из смеси СФТ-1П, подвергаемых обжигу в вакууме (а) и в восстановительной атмосфере (б)

Задавшись максимальной температурой обжига $t_{\text{обж}}$, средой и продолжительностью обжига $\tau_{\text{обж}}$ при максимальной температуре, временем нахождения обожженных форм в атмосфере воздуха до установки их в камеру плавно-заливочной печи $\tau_{\text{хр}}$ и влажностью воздуха ψ , определяют газотворность литейных форм q . Для тонкостенных отливок (толщина стенки менее 5 мм) газотворность следует определять при температуре формы $t_{\text{ф}} = 1200^\circ\text{C}$, для отливок, имеющих стенку толщиной более 5 мм, q определяют при $t_{\text{ф}} = 1400^\circ\text{C}$.

10.3. Повышение химической инертности керамических форм

Графитовые формовочные смеси обладают такими недостатками, как большая усадка в процессе обжига, дефицитность, плохие санитарно-гигиенические условия и др., поэтому для получения отливок из титановых сплавов применяют также керамические формы. Однако формы из огнеупорных оксидов имеют недостаточную, а часто и недопустимо низкую термохимическую стойкость.

С целью повышения химической инертности применяют комбинированные (многослойные) керамические формы, внутренний (рабочий) слой которых обладает свойствами, снижающими загрязнение металла отливки примесями в период ее формирования. Рабочий слой многослойной формы может быть получен следующими способами:

- ♦ нанесение защитного покрытия на рабочую поверхность формы;
- ♦ пропитка поверхностного слоя форм ингибиторами;
- ♦ введение специальных веществ в формовочную смесь, предназначенную для изготовления облицовочного слоя;
- ♦ изготовление облицовочного слоя из наиболее инертных материалов.

По функциональному назначению защитные покрытия подразделяют на барьерные и газозащитные.

Барьерные защитные покрытия наносятся на рабочую поверхность литейной формы и предотвращают непосредственный контакт металла отливки с основным материалом формы. Такие по-

крытия препятствуют химическому взаимодействию конденсированных веществ, входящих в состав формы, с отливкой, но не предохраняют металл от взаимодействия с газами, выделяющимися из формы при ее нагреве заливаемым металлом. В зависимости от метода нанесения материал покрытия может проникать по порам литейной формы на определенную толщину.

Газозащитное покрытие также наносят на рабочую поверхность литейной формы и выполняет функции барьерного, т.е. предотвращает непосредственный контакт расплава с основным материалом формы, и препятствует взаимодействию отливки с газами, выделяющимися из формы.

В зависимости от природы материала покрытия подразделяют на углеродные (графитовые, пироуглеродные), металлические, оксидные, карбидные, нитридные и др.

Пироуглеродное покрытие получают путем термического разложения метана, пропан-бутана и других углеводородных газов и наносят на керамические (корундовые) формы, получаемые по выплавляемым моделям.

Углеводородный газ, попадая в зону высоких температур (более 900 °С), подвергается пиролизу с образованием пироуглерода, который осаждается в порах и на поверхности нагретых керамических форм. Свойства пироуглерода определяются технологическим процессом его получения. Например, пироуглерод, полученный при температурах до 1400 °С, имеет низкую степень ориентации и конусную (турбостратную) структуру с межслоевым расстоянием 0,345 нм. С повышением температуры структура пироуглерода постепенно изменяется, и при 1500–1600 °С он переходит в пирографит, а при 2000 °С – в графит. Процесс осаждения пироуглерода – гомогенный. Его можно осаждать только на инертных по отношению к пироуглероду поверхностях.

Разработаны различные технологические варианты осаждения пироуглерода – продувкой газа через внутреннюю полость литейной формы, принудительной фильтрацией газа через пористую стенку литейной формы при внешнем омывании газа, осаждением пироуглерода в вакууме и др.

На рис. 10.17 приведена одна из возможных схем реактора для обработки форм углеводородными газами. Реактор состоит из цилиндрического корпуса с затвором 7, крышки 1, трубы для подачи

газа 4, турбулизирующей сетки с опорой 11, трубы для отвода продуктов реакции из внутренних полостей форм 3, стаканов 8 для установки форм 10, чехла для термопары 2, перепускного клапана 5. Все элементы, за исключением корпуса, жестко соединены с крышкой в единый блок, который для подготовки к работе извлекают из корпуса, газовые трубы продувают сжатым воздухом, в стаканы устанавливают прокаленные формы и изолируют внешние стенки от внутренних набивкой смеси 9. Блок с формами устанавливают в корпус реактора, в затвор которого насыпают кварцевый песок 6. Собранный реактор помещают в печь, разогретую до 940–980 °С. Через 40–60 мин реактор соединяют с газовой магистралью и 5 мин продувают аргоном. Затем подают пропан концентрацией до 70 %.

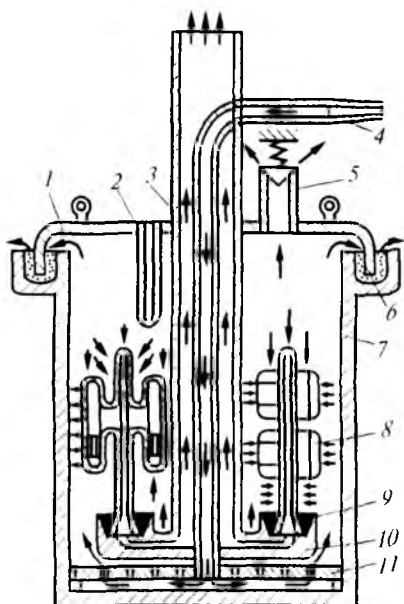


Рис. 10.17. Схема реактора для обработки форм углеводородными газами

Расход газов — пропана и аргона — пропорционален площади поверхности формы или ее массе и на 1 кг массы форм составлял соответственно 2,5 и 1,2 л/мин. Дифференцированный подход к определению расхода газов позволяет стабилизировать давление в объеме реактора в пределах 0,01–0,02 МПа.

Продолжительность процесса (40–90 мин) зависит от толщины стенки отливок. Через указанное время отключают линию

пропана, а спустя 3–5 мин — линию аргона. Реактор из печи представляют в охлаждаемый кожух, через 30 мин разбирают и повторно подготавливают к работе. За смену процесс может повториться до 3 раз, а при использовании установки непрерывного действия — около 6–7 раз. При осаждении пироуглерода в вакууме эффективность процесса повышается.

Пироуглеродное покрытие уменьшает загрязнение металла примесями при литье относительно тонкостенных отливок (толщина стенки менее 5 мм). В остальных случаях не наблюдается значительного положительного эффекта. Это объясняется тем, что такое покрытие не обладает газозащитными функциями и является барьерным, которое лишь предотвращает непосредственный контакт металла с огнеупорными оксидами. Кроме того, термодинамические расчеты показывают, что при высоких температурах пироуглерод может взаимодействовать с SiO_2 и $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, входящими в состав форм, образуя газообразные продукты, которые неизбежно вступают в обменные реакции с металлом и ухудшают его свойства.

С целью повышения химической инертности электрокорундовых форм рекомендуется пропитывать оболочки водным раствором солей KCl , NaCl , MgCl_2 и др. В условиях низкого давления и высоких температур соли диссоциируют. Образующиеся продукты не взаимодействуют с титаном и тем самым частично предохраняют отливку от активных газов, выделяющихся из формы. Формы, обработанные солями, гигроскопичны и поэтому их следует хранить при 250–300 °С.

Комбинированные формы в облицовочном (рабочем) слое содержат фторид натрия и отличаются более высокой термохимической инертностью.

Перспективна графитовая формовочная смесь, в которой в качестве связующего использована смесь галлоидных соединений щелочных элементов и некоторых металлов. При контакте с расплавом флюс испаряется, образуя защитную прослойку между металлом и формой.

Покрытие рабочей поверхности литейных форм тугоплавкими металлами — молибденом, вольфрамом — повышает инертность литейных форм. Эффективность защитного покрытия из молибдена или вольфрама существенно зависит от плотности получае-

мого покрытия. Покрытие наносится на рабочую поверхность электрокорундовых (содержание SiO_2 после обжига около 12 %) и графитокочковых форм путем газофазного осаждения металла при термическом разложении карбониллов или окунания элементов формы в смесь, состоящую из мелкодисперсного порошка и связующего, легко удаляемого при нагреве.

При газофазном способе нанесения на поверхности керамических форм образуется тонкое, но плотное и герметичное покрытие, которое предохраняет металл от взаимодействия как с конденсированными фазами, входящими в состав формы, так и с газами, выделяющимися из формы. Это покрытие существенно снижает загрязнение металла примесями, что подтверждается незначительным увеличением микротвердости сплава в поверхностном слое отливки (рис. 10.18, кривая 2).

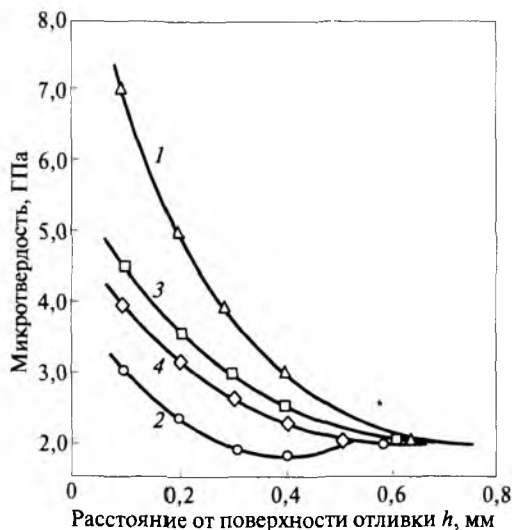


Рис. 10.18. Влияние покрытия из вольфрама на микротвердость H_μ поверхностного слоя отливки сплава ВТ1Л:

1, 2 — электрокорундовая форма; 3, 4 — графитокочковая форма; 1, 3 — без покрытия; 2, 4 — с покрытием

Нанесение аналогичным способом покрытия на графитокочковые формы не дает положительных результатов: на поверхности формы не образуется сплошного герметичного покрытия и оно не предохраняет металл от потока газов, выделяющихся из формы (рис. 10.18, кривая 4). На покрытии, полученном окунанием, образуется пористый слой, который не обладает достаточными защитными функциями.

Весьма перспективны металлические покрытия, изготовленные из геттеров. Среди известных твердых веществ титан обладает практически максимальной газопоглощающей способностью при температурах выше 1100°C . Поэтому нанесение титана на рабочую поверхность литейной формы в виде пористого или сплошного покрытия приводит к существенному, а в ряде случаев к полному предотвращению химического взаимодействия отливки и формы. Титановое покрытие, нагреваясь до высоких температур, в период формирования отливки выполняет барьерные функции и как активный геттер поглощает газообразные продукты, выделяющиеся из формы.

Исследование отливок из сплава ВТ5-1, полученных в керамических и графитокосовых формах с титановым покрытием, показало, что они практически не загрязнены примесями (рис. 10.19, кривая 5). Но с увеличением толщины отливок возрастает температура на поверхности литейной формы и эффективность титанового покрытия уменьшается.

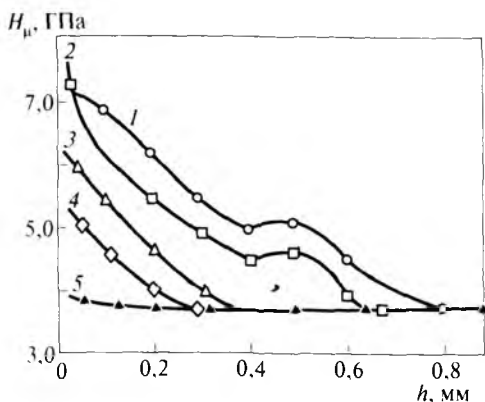


Рис. 10.19. Влияние титанового покрытия на микротвердость поверхностного слоя отливок (h — расстояние от поверхности отливки) из сплава ВТ5-1, полученных в формах:

1 — электрокорунд + 12 % SiO_2 ; 2 — электрокорунд + 2,5 % SiO_2 ; 3 — прессованный электрокорунд; 4 — смесь СФТ-2П; 1-4 — формы без покрытия; 5 — из материалов 1-4 с титановым покрытием

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие физико-химические процессы получают развитие при формировании отливки в литейной форме? Как это отражается на механических свойствах литого металла?
2. Из каких химических веществ состоят графитовые и керамические литейные формы? Какие продукты выделяются из формы в период формирования отливки? К каким дефектам отливок это приводит?

3. В чем заключается особенность кинетики затвердевания титановых сплавов?
4. Опишите два основных варианта кинетики затвердевания титановых сплавов в литейной форме. Какой вариант предпочтительнее и почему?
5. Расплав титанового сплава, попадая в рабочую полость литейной формы, вступает в контакт с конденсированной фазой (зерна огнеупорного материала) и газами, выделяющимися из связующего вещества. Раскройте физико-химические процессы, происходящие в этот период.
6. Перечислите способы повышения химической инертности литейных форм для титанового литья.
7. Назовите режим обжига графитовых литейных форм, приводящий к наиболее низкому значению газотворности.
8. Для литья титановых отливок применяют керамические литейные многослойные формы, которые имеют пониженную химическую активность по отношению к титану. Назовите способы получения подобных форм.

ГЛАВА 11 ВОДОРОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ¹

11.1. Основы водородной технологии производства титановых отливок

Повышение качества титановых отливок и прежде всего их поверхностного слоя — первоочередная задача литейной технологии. Разработка методов воздействия на формирование структуры и свойств литого металла, управление состоянием поверхностного слоя отливок являются основными направлениями ее совершенствования. Для повышения качества отливок используют защитные покрытия литейных форм из тугоплавких металлов и соединений, а для улучшения свойств литого металла при изготовлении отливок ответственного назначения — операцию горячего изостатического прессования.

В последнее время развивается принципиально новое научное направление — водородная технология титановых сплавов, основанная на использовании уникальных свойств водорода временно влиять на структуру и свойства титана и его сплавов, что позволяет решать разнообразные задачи в области материаловедения и технологий заготовительного производства титановых сплавов.

Взаимодействие титана с водородом характеризуется рядом специфических эффектов и особенностей, благодаря которым при определенных условиях можно совершенствовать технологический процесс производства отливок из титановых сплавов. Водород является единственным элементом, взаимодействие которого с титаном носит обратимый характер, и это обстоятельство предопределяет значимость водорода как временного легирующего элемента, вводимого в металл для решения определенной технологической задачи, а затем удаляемого вакуумным отжигом.

¹ Глава написана А.М. Надежиным на основе совместно проведенных исследований с авторами настоящей книги.

Роль воздействия водорода на свойства титана и его сплавов многообразна и уникальна:

- ◇ растворимость водорода в титане с повышением температуры падает и поэтому водород может использоваться в качестве среды при формировании титановых отливок в высокотемпературной области, наиболее опасной с точки зрения появления дефектов литья (метод формирования отливок из титановых сплавов в формах с покрытиями из водородосодержащих материалов);
- ◇ существенное влияние водорода на фазовые и структурные превращения в титановых сплавах, что создает реальную возможность управлять структурой и свойствами металла отливок (метод поверхностного водородного модифицирования литой структуры в сочетании с методом формирования отливок в водородосодержащих формах);
- ◇ водород значительно повышает хрупкость титановых сплавов при низких температурах за счет выделения в структуре металла гидридной фазы, что облегчает работу механического разрушения наводороженных сплавов и открывает возможность отделения элементов литниково-питающей системы от отливок и измельчения литейных отходов на куски и в порошок (метод локального водородного охрупчивания элементов отливок и литейных титановых отходов в сочетании с разрушением металла изгибом, ударом и др.);
- ◇ водород способен пластифицировать металл при температурах выше температуры фазового превращения, что проявляется в снижении удельных усилий деформации металла в условиях горячего и статического прессования отливок из титановых сплавов при исправлении внутренних дефектов газоусадочного характера (метод горячего изостатического прессования отливок в режиме водородного пластифицирования титановых отливок);
- ◇ водород оказывает благоприятное влияние на механическую обработку титановых сплавов и изделий из них (отливок) резанием за счет снижения температуры в зоне резания, уменьшения усилия, улучшения стружкообразования и повышения стойкости инструмента;
- ◇ при определенных условиях водород является восстановителем по отношению к оксидным включениям в титановых сплавах и может быть использован в качестве восстановительной рафинирующей среды при переработке порошкообразных и мелкокусковых отходов, а также при плавлении металла с добавлением отходов.

Указанные положительные эффекты, обусловленные водородом, можно использовать на всех технологических стадиях формирования отливок и их последующей обработки, при плавлении металла и переработке отходов, в том числе некондиционных.

Использование водородной технологии получения отливок из титановых сплавов позволяет комплексно решать проблемы литейного производства: повысить качественные показатели литого металла и самих отливок, по безотходной схеме производить отделение элементов литниково-питающей системы и измельчать литейные отходы перед повторным использованием, повысить качество металла шихтовых материалов, улучшить санитарно-гигиенические и экологические показатели производства за счет исключения из технологического процесса ацетилено-кислородной резки металла.

Введение водорода в металл и вакуумный отжиг отливок являются по существу дополнительными и в ряде случаев дорогостоящими операциями. Поэтому рациональный подход к созданию водородной технологии предполагает ограничение введения водорода в металл зонально и в концентрациях, не превышающих допустимых пределов для литейных сплавов. Процессы, в которых необходимо обратимое водородное легирование до более высоких концентраций, должны давать неоспоримые преимущества, например горячее изостатическое прессование в режиме водородного пластифицирования металла, механическая обработка отливок. Локальное и поверхностное введение водорода в металл на различных этапах литейной технологии позволяет облегчить операцию вакуумного отжига отливок, а в ряде случаев и вовсе отказаться от нее. Кроме того, с целью повышения эффективности водородной технологии процесс введения водорода в металл следует совмещать с проведением основных операций изготовления титановых отливок.

Таким образом, элементами водородной технологии получения отливок из титановых сплавов являются:

- 1) процесс формирования титановых отливок в среде водорода с целью предотвращения загрязнения металла вредными примесями внедрения кислорода, азота, углерода;
- 2) процесс безотходного отделения элементов литниково-питающей системы от отливок и процесс измельчения отходов на куски под

действием механической нагрузки с использованием метода локального водородного охрупчивания;

- 3) процесс горячего изостатического прессования титановых отливок в режиме водородного пластифицирования литого металла;
- 4) процессы безотходной очистки загрязненных отходов, механической обработки отливок резанием и переработки толстостенных некондиционных титановых отходов на основе использования метода регулируемого поверхностного наводороживания (охрупчивания) с целью снижения трудоемкости процессов, материальных и энергетических затрат, повышения стойкости режущего инструмента и улучшения санитарно-гигиенических условий труда;
- 5) процесс переработки некондиционных литейных тонкостенных титановых отходов в порошок методом объемного гидрирования-дегидрирования с одновременным водородным рафинированием металла от примесей кислорода с целью рационального комплексного использования отходов в основном производстве;
- 6) процессы компактирования отходов с использованием эффекта водородного пластифицирования металла с целью снижения материало-энергетических затрат при производстве шихтовых материалов.

11.2. Формирование отливок в атмосфере водорода

Создание защитной атмосферы водорода в процессе формирования отливок происходит при тепломассообмене между отливкой и литейной формой с покрытием из водородосодержащих материалов на основе гидрированных порошков титана с определенным содержанием водорода.

Под действием теплоты отливки происходит термическое разложение гидрида титана с выделением спектрально чистого водорода при температуре выше 300–400 °С. Скорость процесса разложения резко возрастает с увеличением температуры (рис. 11.1).

Равновесное давление водорода при диссоциации гидрида титана определяется по следующей формуле:

$$\lg P = -1280/T + 0,51 \lg T + 4,65,$$

где P — равновесное давление водорода, Па; T — температура, К.

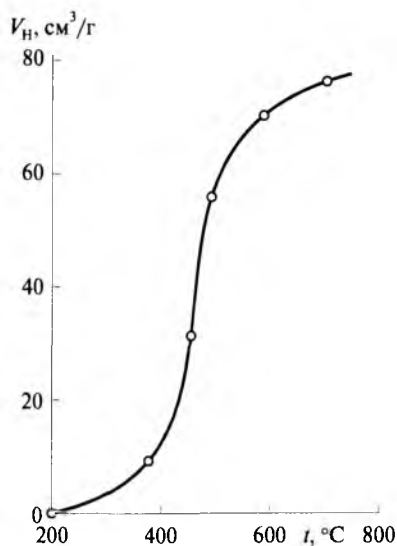


Рис. 11.1. Зависимость объема выделяющегося водорода V_H от температуры t нагрева гидрида титана со скоростью 200 К/мин при давлении 0,13 Па

Из условий массообмена в системе водородосодержащее покрытие Ti_mH_n — металл отливки Ti , когда температура отливки значительно выше температуры материала покрытия, выделяющийся водород частично диффундирует в металл. Основная часть газообразного водорода путем фильтрации удаляется через форму вакуумной системой плавно-заливочной установки. При температуре металла выше 1000 °С поглощательная способность титана в 10–30 раз ниже предела растворимости титана при нормальной температуре.

Процесс выделения водорода как по давлению, так и по времени опережает процесс выделения активных газов формы, что и предопределяет его защитную функцию — способность за счет направленности потока водорода от поверхности отливки оттеснять активные газы формы от границы ее контакта с металлом. В этом случае содержание водорода в материале покрытия должно превышать газосодержание в формовочном материале. В то же время максимальное давление водорода на границе с металлом отливки в начальный период ее формирования, когда металл находится в жидком состоянии, должно быть ограничено, чтобы исключить возможность образования газовых дефектов в отливке по вине водорода за счет пузырькового проникновения.

Теплофизические условия формирования титановых отливок и особенности взаимодействия титана с водородом и газообразными продуктами литейной формы ограничивают длительность процесса водородной защиты литого металла длительностью охлаждения отливки до температуры 900–1000 °С, когда растворимость водорода в титане остается незначительной, а интенсивность его взаимодействия с газообразными компонентами литейной формы исключительно высока.

Сушность процесса формирования титановых отливок в водородосодержащих формах поясняется схемой, приведенной на рис. 11.2.

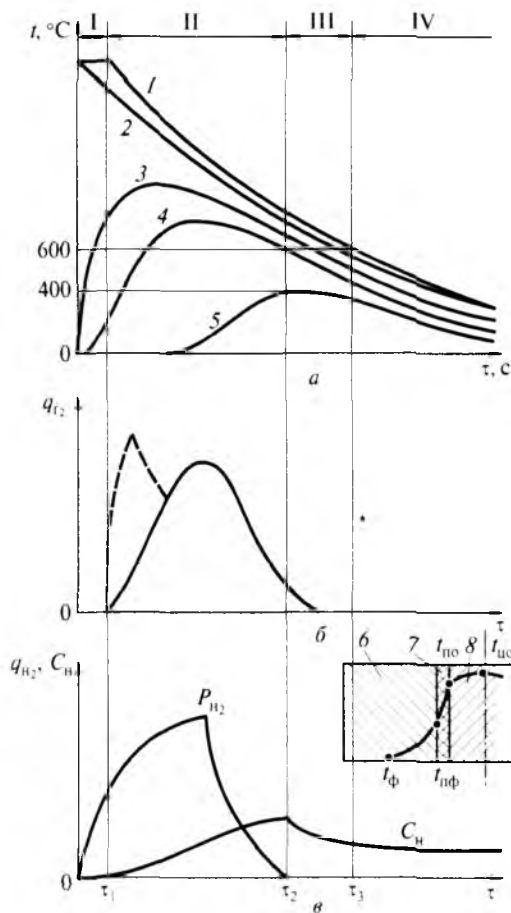


Рис. 11.2. Температурный (а) и газовые режимы формирования титановых отливок в графитовых (б) и водородосодержащих (в) формах:

1–5 – кривые изменения температуры; 1 – в центре отливки; 2 – на ее поверхности; 3 – водородосодержащего покрытия; 4 – на поверхности формы; 5 – формы на глубине максимального прогрева до 400 °С (нулевая газотворность); 6 – форма; 7 – покрытие; 8 – отливка; I–IV – этапы формирования отливки

Этап I. Начальный этап формирования отливки ($0 - \tau_1$) – заполнение металлом формы и образование твердой корочки на поверхности отливки. Термическое воздействие воспринимает водородосодержащее покрытие. Под действием теплоты отливки происходит разложение гидрированных порошков титана с выделением водорода. Следовательно, этап I характеризуется тем, что вокруг отливки создается атмосфера водорода – защитная газообразная среда. Выделения газов формы не происходит и, несмотря на реальную возможность образования газовых дефектов в отливке, вероятность пузырькового проникновения ничтожно мала и то лишь за счет водорода, если газосодержание материала покрытия превысит некоторое критическое значение.

Этап II ($\tau_1 - \tau_2$) характеризуется газовыделением из материала графитовой формы (рис. 11.2, б) и выделением водорода из покрытия (рис. 11.2, в) при довольно интенсивном охлаждении отливки (рис. 11.2, а). На этом этапе должна обеспечиваться защита металла отливки от активных газов формы за счет их оттеснения потоком водорода от поверхности отливки.

Из анализа тепловых условий формирования отливок следует, что температурное поле формы на этом этапе характеризуется резким перепадом в пограничной с отливкой зоне, т.е. в материале покрытия ($t_{по} - t_{пф}$). В этом случае снижается прогрев материала графитовой формы, что заметно уменьшает объем выделяющихся из формы газов. Если между отливкой и формой образуется зазор, температура на поверхности формы $t_{пф}$ будет еще более низкой. Поскольку на данном этапе слой покрытия после прогрева до максимальной температуры охлаждается, то интенсивность выделения водорода q_H после достижения максимального значения снижается до нуля. Аналогично изменяется давление водорода на границе металл–форма. Растворимость водорода в металле C_H прогрессивно увеличивается до максимального значения. Для повышения эффективности защиты металла отливки форма перед заливкой должна быть прогрета до 200–300 °С с целью исключения влияния физически сорбированных газов (рис. 11.2, б, штриховая линия).

Этап III ($\tau_2 - \tau_3$) – формирование отливки в интервале температур 1100–600 °С, когда растворимость водорода в титане возрастает при одновременном снижении коэффициента диффузии. Га-

зовая фаза вокруг отливки состоит из химически сорбированных формой газов. Парциальное давление водорода практически равно нулю, поэтому будет наблюдаться некоторая дегазация металла отливки от растворенного водорода. На этом этапе наблюдается вторичная защита металла отливки за счет потока водорода от поверхности металла отливки и содержание водорода в металле C_H несколько снижается.

Этап IV – финальный этап охлаждения титановой отливки в вакууме. Диффузионная подвижность водорода в титане при температуре ниже 600 °С мала, поэтому заметного снижения содержания водорода в металле отливки не наблюдается.

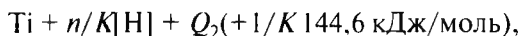
Следует отметить еще один положительный эффект от использования защитных водородосодержащих покрытий на основе гидрированных порошков титана. Поскольку отливка окружена практически оболочкой из мелкодисперсного порошкообразного титана с большой удельной поверхностью и высокой реакционной способностью, то покрытие по отношению к газам формы выполняет не только барьерную роль, но и роль активного газопоглотителя.

При формировании титановых отливок в водородосодержащих формах протекает несколько процессов:

- ♦ термическое разложение гидридной фазы материала покрытия, сопровождающееся эндотермическим эффектом:

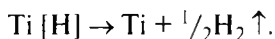


- ♦ насыщение поверхностного слоя отливок водородом за счет его частичного диффузионного растворения в титане (экзотермический тепловой эффект химической реакции):



где $1/K$ – коэффициент усвоения водорода металлом отливки в области высоких температур формирования отливки, изменяющийся в пределах $1/30 - 1/10$;

- ♦ создание защитной среды в зазоре вокруг титановой отливки свободной неусвоенной частью водорода;
- ♦ дегазация металла отливки на стадии ее охлаждения, когда парциальное давление водорода в атмосфере, окружающей отливку, становится ниже равновесного давления растворенного в металле отливки газа:



В тепловом отношении процесс формирования отливки в водородосодержащей форме более благоприятен, чем при литье в обычную форму. Если при обычном литье процесс физико-химического взаимодействия сопровождается выделением значительного количества теплоты (до 380–560 кДж/моль), то при литье в водородосодержащие формы наблюдается «захлаживающий» эндотермический эффект (–130 кДж/моль). Кроме того, высокая молекулярная теплопроводность водорода и его направленный поток также способствуют интенсификации процесса охлаждения отливки и получению более благоприятной структуры литого металла.

Объем выделившегося из покрытия водорода и его парциальное давление в зазоре на границе металл–форма, длительность и интенсивность процесса выделения водорода из материала покрытия и его содержание в поверхностном слое металла отливок являются контролируемыми параметрами. Они в свою очередь определяются толщиной покрытия, содержанием в нем водорода и зависят от тепловых условий формирования отливок.

Разработаны способы литья титановых сплавов в кокиль и разовые формы на основе огнеупорных материалов с покрытием из гидрированных порошков титана с различным содержанием водорода.

Кокили изготавливают из титана (сплав ВТ1-0) путем механической обработки литых или деформированных заготовок. Изготовленную форму или ее отдельные части – вставки – наводороживают 15–30 мин при температуре 600 °С и давлении водорода 0,01 МПа до содержания 0,1–0,3 % (по массе). Метод применим при изготовлении относительно небольших, простых по конфигурации отливок со стенкой толщиной 5–10 мм. Каждая заливка металла приводит к снижению содержания водорода в форме на 0,05–0,07 % (по массе), поэтому в одной форме получают 2–3 отливки, после чего форма должна подвергаться повторному наводороживанию.

Водородосодержащее покрытие для форм по выплавляемым моделям представляет собой суспензию на основе мелкодисперсных гидрированных порошков титана из частиц крупностью менее 0,05 мм (46,9–49,5 %) и синтетического связующего – фенолформальдегидной смолы (27,2–49,5 %) с добавлением катализатора – соляной кислоты (3,5–3,8 % по массе) и растворителя – этилового спирта (остальное). Суспензия наносится на легкоплавкую модель окунанием. Содержание водорода в порошке

0,1–0,2 % (по массе). Обжиг оболочковых форм рекомендуется проводить в автогенерируемой водородосодержащей атмосфере при 1000–1100 °С.

Для создания водородосодержащего покрытия на поверхности разъемной формы используют эмульсию, не содержащую связующего. Ее состав – порошок гидрированного титана 40–70 % (по массе) и этиловый спирт 30–60 % (по массе). Эмульсия наносится пульверизатором или кисточкой на рабочую поверхность формы перед ее сборкой или склейкой.

Если в металл требуется ввести больше водорода для отливок, подвергаемых механической обработке или газостатированию, приготавливается суспензия или эмульсия на основе гидрированных порошков титана с более высоким содержанием водорода 0,5–1,0 % (по массе). Этот состав наносится на предыдущий либо на всю поверхность формы (стержня), либо на участки, которые должны подвергаться механической обработке.

В табл. 11.1 представлены данные, показывающие влияние покрытия из гидрированного порошка титана на содержание примесей (кислорода, углерода, водорода) в поверхностном слое и центре отливок из сплава ВТ5Л толщиной 7,5 см.

Таблица 11.1. Влияние покрытия из гидрированного порошка титана на содержание примесей в отливке (сплав ВТ5Л) с толщиной стенки 7,5 мм (Д – допустимое предельное содержание; П – содержание на поверхности отливки (в слое толщиной 0,1 мм); Ц – содержание в центре отливки)

№ п/п	Материал формы	Содержание элементов, %								
		Кислород			Углерод			Водород		
		Д	П	Ц	Д	П	Ц	Д	П	Ц
1	СФТ-1	0,2	0,68	0,08	0,2	0,45	0,02	0,015	0,012	0,004
2	СФТ-1 + + TiH ₂	–	0,18	0,08	–	0,08	0,02	–	0,018	0,0042
3	СФТ-1 + + покр. TiH ₂	–	0,15	0,07	–	0,07	0,01	–	0,028	0,0038
4	Кокиль Ti + + 0,3% H ₂	–	0,08	0,08	–	0,01	0,01	–	0,03	0,0043
5	Стержень из TiH ₂	–	0,12	0,07	–	0,015	0,01	–	0,02	0,0043

При введении гидрида титана или нанесении его на рабочую поверхность формы инертность формовочного материала по отношению к металлу отливки значительно выше, чем в исходной форме из смеси СФТ-1. Насыщение литого металла вредными примесями внедрения (кислородом и углеродом) уменьшается ниже допустимого уровня содержания этих примесей в сплаве ВТ5Л. При этом наблюдается некоторое превышение допустимого содержания водорода на поверхности титановых отливок, полученных в форме с покрытием из гидрированных порошков титана (№ 3 в табл. 11.1), в кокиле, наводороженном до содержания 0,3 % (№ 4), и в стержнях, изготовленных из гидрированных порошков титана (№ 5).

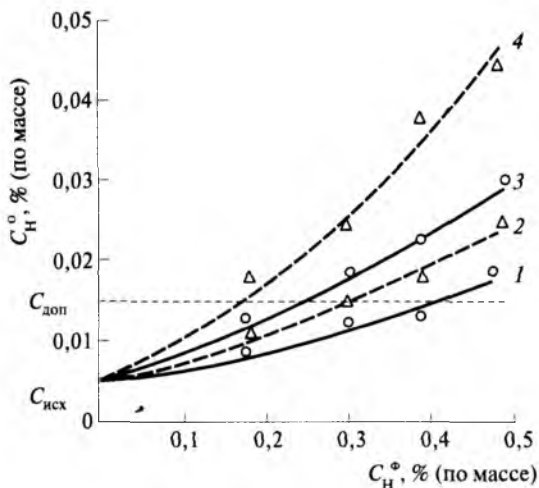


Рис. 11.3. Зависимость содержания водорода в металле отливки C_H^0 от содержания водорода в покрытии $C_H^Ф$.

1 — в покрытии графитовой формы; 2 — в титановом кокиле; 3 — в покрытии графитового стержня; 4 — в спеченном из порошков гидрированного титана стержне; 1, 3 — газопроницаемые формы; 2, 4 — газонепроницаемые

На рис. 11.3 представлены данные, позволяющие оценить степень наводороживания поверхностного слоя титановых отливок в зависимости от содержания водорода в материале литейных форм и стержней как газопроницаемых, так и газонепроницаемых. Видно, что степень наводороживания у отливок, контактировавших с

водородосодержащим материалом стержней, выше, чем у отливок, контактировавших с материалом водородосодержащей формы. Подбирая содержание водорода в материале литейной формы, можно избежать последующего вакуумного отжига отливок, когда содержание водорода на поверхности отливки не превышает допустимого предела $C_{\text{доп}} 0,015\%$ (по массе) для сплава ВТ5Л.

Важнейшими показателями качества отливок являются содержание вредных примесей внедрения и микротвердость в поверхностном слое литого металла, что зависит от физико-химического взаимодействия отливки с материалом литейной формы.

На рис. 11.4 представлены сравнительные данные по насыщению кислородом и углеродом поверхностного слоя отливок из сплава ВТ5Л с толщиной стенки 7 мм, полученных в графитовых формах без покрытия и в формах с водородосодержащим покрытием (начальное содержание водорода 0,1 % по массе). Для сплава ВТ5Л содержание кислорода и углерода ограничивается пределом 0,2 % (по массе).

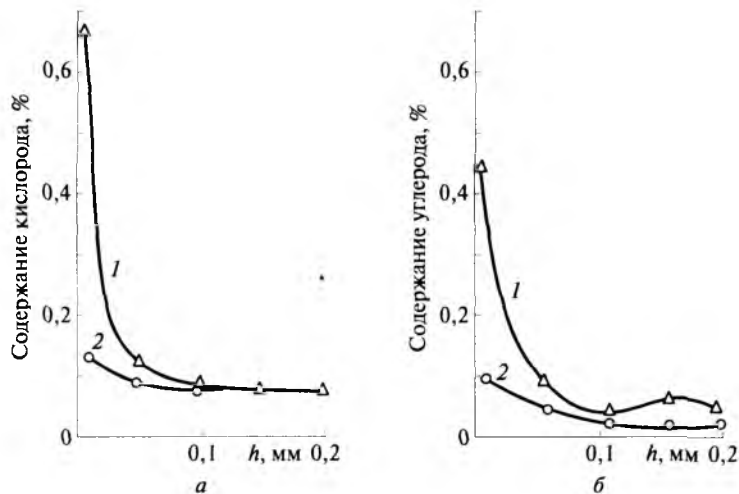


Рис. 11.4. Изменение содержания кислорода (а) и углерода (б) по глубине h поверхностного слоя отливок из сплава ВТ5Л, полученных в графитовых формах без покрытия (кривая 1) и с водородосодержащим покрытием (кривая 2) на основе гидрида титана

Формирование титановых отливок в формах с водородосодержащим покрытием позволяет значительно повысить качество по-

верхности титановых отливок, снизить содержание кислорода и углерода примерно в 4 раза, уменьшить в 4 раза глубину газонасыщенного слоя. Соответственно снижается микротвердость в поверхностном слое отливок (рис. 11.5). Поверхностные трещины и пригар на поверхности отливок не появились.

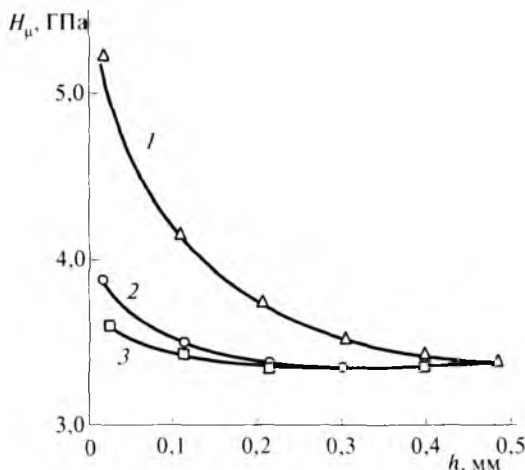


Рис. 11.5. Изменение микротвердости H_μ по глубине h поверхностного слоя отливок диаметром 40 мм из сплава ВТ5Л, полученных в графитовых формах. Начальное содержание водорода в покрытии составляло 0,1 % (по массе), а в титановом кокиле — 0,3 % (по массе):

1 — без покрытия; 2 — с водородосодержащим покрытием; 3 — в наводороженном титановом кокиле

11.3. Безотходное отделение литников и прибылей от отливок

В производственном процессе изготовления фасонных отливок из титановых сплавов, обладающих высокой удельной прочностью, одной из наиболее трудоемких операций является отделение элементов литниково-питающей системы (ЛПС) от литой детали. В настоящее время эта операция осуществляется преимущественно методами огневой резки и резки абразивными кругами, что обуславливает ее экологическую вредность. Ацетилено-кислородная обрезка отливок сопровождается как прямыми

безвозвратными потерями (до 6–10 %) металла, так и косвенными (до 0,5–2 %), связанными с повышенным окислением металла в зоне реза и его потерями при очистке отливок и отходов. Кроме того, из-за сложности и разветвленности ЛПС блока отливок, получаемых центробежным литьем, их обрубка часто не поддается механизации и производится вручную.

Безотходные способы отделения литников и прибылей от отливок основаны на применении локального водородного охрупчивания металла в местах присоединения литников и прибылей к отливкам с целью их последующего разрушения под действием механической нагрузки.

При нормальной температуре водород обладает сильным охрупчивающим эффектом по отношению к титановым сплавам вследствие ограниченной растворимости водорода в металле и его выделения в виде гидридной γ -фазы, имеющей более слабое сцепление с матричным металлом и больший удельный объем, чем титан. Введение водорода в металл может осуществляться в результате тепломассообмена между металлом отливки и аккумулятором водорода — наводороживающим элементом.

В практике литейного производства использование наводороживающих элементов является новым техническим приемом. Он исключает применение газообразного водорода и по этой причине повышает безопасность технологии в целом и предотвращает вторичное загрязнение металла вредными примесями внедрения — кислородом и углеродом, неминуемо присутствующими в баллонном водороде. В качестве аккумуляторов водорода используют элементы из предварительно наводороженного до концентраций 0,5–2,0 % (по массе) титана, повторяющие конфигурацию элемента ЛПС (пластина, кольцо, полукольцо и т.д.), или из наводороженной титановой проволоки в виде спирали, сетки.

Наводороживающие элементы проставляются в соответствующих местах литейной формы (рис. 11.6), что требует незначительного изменения модельного комплекса ЛПС в процессе сборки форм перед их заливкой. Нагрев аккумулятора водорода тепловой, выделяемой металлом отливки, приводит к выделению из него спектрально чистого водорода, который переходит в металл отливки, насыщая его в поверхностном слое.

Интенсивность массопереноса и характер распределения водорода в поверхностном слое металла отливки определяются тем-

пературными условиями взаимодействия и зависят от начальной концентрации водорода в аккумуляторе.

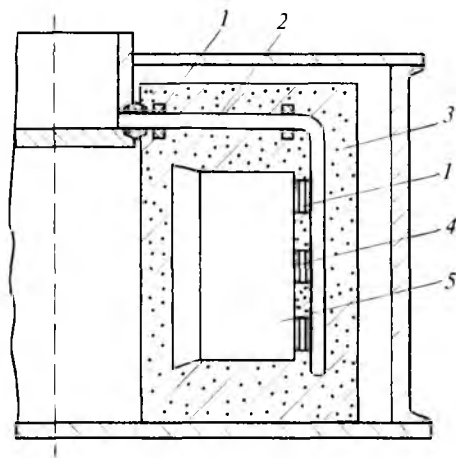
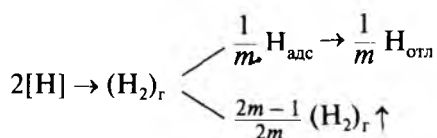


Рис. 11.6. Схема простановки наводороживающих элементов в каналах литниковой системы при центробежном литье титановых отливок:

1 — наводороживающий элемент; 2 — литниковый ход; 3 — литейная форма; 4 — питатель; 5 — рабочая полость формы

Реакция переноса водорода из аккумулятора в отливку может быть представлена схемой:



Перенос водорода в отливку происходит через газовую фазу, формирующуюся в граничной области раздела отливки с наводороживающим элементом. Насыщение поверхностного слоя отливки водородом является сложным диффузионным процессом, протекающим в неравновесных условиях и при фазовом превращении β - α -титана.

Процесс диффузии водорода в отливку из α -титанового сплава состоит из двух периодов.

В первом периоде проходит диффузия водорода в гомогенной β -фазе, т.е. в интервале температур заливки металла и начала фазового превращения $\beta \rightarrow \alpha$, в основном под действием градиента

концентрации $\text{grad } C$, который создает поток J диффузии, направленный от поверхности к центру отливки:

$$J = D \text{grad } C,$$

где D — коэффициент диффузии водорода в β -титане.

Во втором периоде диффузия водорода проходит в интервале температур фазового превращения $\beta \rightarrow \alpha$. Появление α -фазы способствует возникновению межфазной диффузии и образованию скачка концентраций водорода на границе раздела фаз, так как растворимость водорода в α -фазе значительно меньше, чем в β -фазе. Это явление, а также снижение температуры отливки при ее охлаждении значительно замедляют диффузию водорода.

Можно предположить, что на первом этапе наводороживания в металл поступает основной поток водорода, а на втором этапе протекает преимущественно процесс перераспределения водорода под действием межфазной диффузии, поскольку к этому моменту выделение водорода из аккумулятора в зазор с отливкой практически полностью прекращается.

Охрупчивание металла в поверхностном слое отливок при локальном наводороживании играет роль концентратора напряжений и может инициировать хрупкое разрушение отливки под действием механической нагрузки. Эффективность разрушения повышается при использовании динамической, ударной или виброударной нагрузки. На локальное наводороживание титановых отливок большое влияние оказывает исходная концентрация водорода в наводороживающих элементах. На рис. 11.7 показано распределение содержания водорода в поверхностном слое отливок из сплава ВТ5Л диаметром 40 мм, локально наводороженных с помощью наводороживающих элементов с концентрацией водорода от 0,5 до 2,0 % (по массе). На всех кривых присутствует скачок (перепад) концентрации водорода на некотором расстоянии от поверхности отливки. Этому расстоянию примерно соответствует глубина охрупченного поверхностного слоя, обеспечивающего хрупкое разрушение металла без пластической деформации при изгибе и со снижением в 6–8 раз нагрузки разрушения по сравнению с литым металлом. Это достигается при средней концентрации водорода в охрупченном слое выше 0,25–0,35 % (по массе) для сплавов на основе титана. Хрупкий механизм разрушения наблюдается при минимальной (критической) толщине охрупченного слоя 1,5–2,0 мм.

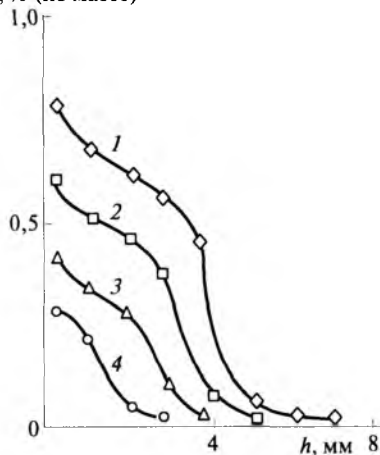
H , % (по массе)

Рис. 11.7. Изменение содержания водорода C_H по глубине поверхностного слоя отливок из сплава ВТ5Л, локально наводороженных с помощью элементов-аккумуляторов с исходной концентрацией водорода: 1 — 2,0 %; 2 — 1,5 %; 3 — 1,0 %; 4 — 0,5 % (по массе)

На рис. 11.8 представлена зависимость глубины наводороженной зоны отливок диаметром 40, 30 и 20 мм из сплава ВТ5Л от исходной концентрации водорода в наводороживающих элементах. Минимальная концентрация водорода в элементах, вызывающая хрупкий механизм разрушения при изгибе, составляет около 0,5 % для отливки диаметром 40 мм и около 1,0 % — диаметром 20 мм. Увеличение глубины наводороженной зоны более критического

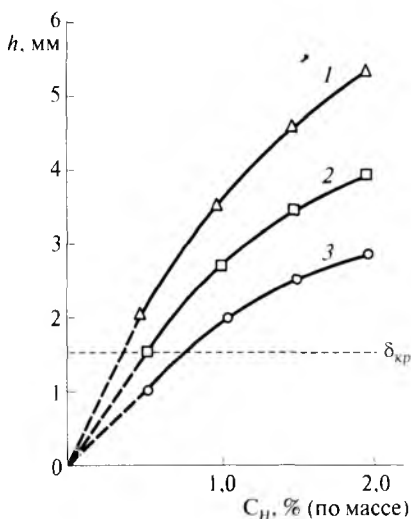


Рис. 11.8. Влияние исходной концентрации водорода C_H в элементах-аккумуляторах на глубину наводороженной зоны h в отливках из сплава ВТ5Л диаметром: 1 — 40 мм; 2 — 30 мм; 3 — 20 мм

значения δ_k практически не приводит к существенному снижению нагрузки разрушения при изгибе (см. рис. 11.7).

На рис. 11.9 приведена зависимость нагрузки разрушения литых, локально наводороженных образцов диаметром 40 мм из сплава ВТ5Л от толщины (глубины) охрупченного наводороженного слоя.

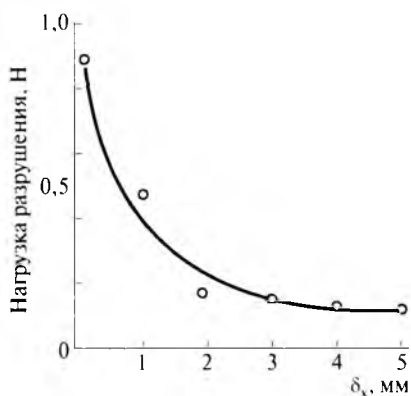


Рис. 11.9. Влияние толщины охрупченного слоя δ_k на нагрузку разрушения на изгиб P локально наводороженных отливок из сплава ВТ5Л диаметром 40 мм

Для отделения элементов литниковых систем следует использовать наводороживающие элементы следующих размеров: ширина не менее 5 мм, толщина 4–5 мм, заглубление в канал литниковой системы 1–2 мм. Форма элемента должна соответствовать профилю канала, на который его устанавливают. Содержание водорода в элементах рекомендуется в пределах 0,5–2,0 % (по массе).

Для локального водородного охрупчивания мест присоединения прибылей к отливкам используют наводороживающие элементы — разъемные диафрагмы в виде полуколец или пластин из наводороженного титана до 0,5–1,0 % (по массе) толщиной 2–4 мм (рис. 11.10).

По физической сути процесс отделения прибылей от отливок аналогичен процессу отделения элементов литниковой системы. Однако имеются некоторые отличия. Прежде всего необходимо уменьшить исходную концентрацию водорода в наводороживающих элементах, чтобы исключить опасность образования газовой пористости в отливках по вине водорода. Вместе с тем для снижения нагрузки разрушения при отделении прибыли от отливки нужно сократить площадь их соединения за счет ее перекрытия

наводороживающим элементом в виде тонкой разъемной диафрагмы. Причем перекрытие до 60 % площади соединения не оказывает влияния на эффективность питания отливки прибылью.

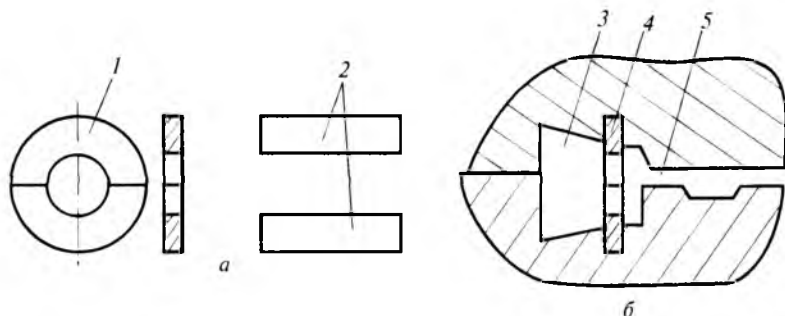


Рис. 11.10. Схемы наводороживающих элементов для отделения прибылей от отливок (а) и простановки их в литейную форму (б):

1 — отливки в виде двух полуколец; 2 — отливки в виде пластин; 3 — прибыль; 4 — наводороживающий элемент; 5 — отливка

Отделение элементов ЛПС отливки по охрупченному сечению производится под действием нагрузки P , прикладываемой с одной стороны путем вдавливания клиновидных пуансонов в полость отливки, образуемой диафрагмой. С противоположной стороны используется роликовый упор (рис. 11.11). При такой схеме нагружения в охрупченно суженном сечении возникают растягивающе-изгибающие напряжения. Эффективность разрушения возрастает в случае приложения виброударной нагрузки к клиновидному пуансону.

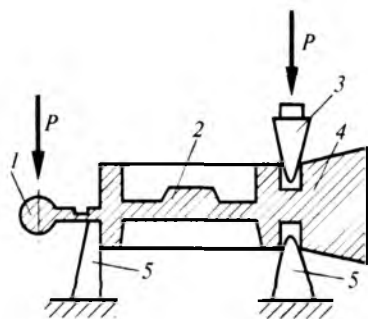


Рис. 11.11. Схема отделения элементов ЛПС от отливки под действием нагрузки P в локально охрупченных водородом местах:
1 — литник; 2 — отливка; 3 — пуансон; 4 — прибыль; 5 — упор

Данные условия разрушения под действием статической нагрузки, создающей изгибающий момент при отделении литников

от отливок и растягивающе-изгибающие напряжения при отделении прибылей от отливок, по своей эффективности идентичны и позволяют снизить прикладываемую нагрузку в 6–8 раз. При отделении элементов ЛПС исключаются приложение нагрузки непосредственно к отливке и, следовательно, ее коробление, деформация и необходимость жесткой фиксации отливки. Отливка может подаваться к прессу и удерживаться в рабочей зоне с помощью манипулятора. Данный способ позволяет механизировать операции отделения элементов ЛПС от отливок из титановых сплавов и значительно повысить их производительность.

11.4. Переработка и подготовка к использованию литейных отходов

Анализ баланса металла в производстве отливок из титановых сплавов показывает, что в среднем выход годного составляет 21 %. При получении 1 т годных отливок образуется около 3,3 т отходов производства и около 0,5 т дефицитного металла безвозвратно теряется.

В число основных операций подготовки отходов к плавке входят измельчение и очистка крупногабаритных отходов. В настоящее время для обрубки отливок и измельчения отходов в литейных цехах наиболее широко используется ацетилено-кислородная резка металла, которая обуславливает максимальные потери дефицитного материала, связанные с плавлением и сжиганием металла на воздухе, поверхностным окислением металла в измельченных кусках и насыщением их поверхностного слоя вредными примесями. Кроме того, огневая резка отходов отличается экологической вредностью и неблагоприятными санитарно-гигиеническими условиями труда.

Наличие на поверхности отходов литейной корочки — альфированного газонасыщенного слоя — предполагает проведение операции очистки. Механические способы очистки малопроизводительны и длительны. В то же время получение титановых отливок с чистой бездефектной поверхностью за счет применения химически инертных формовочных материалов или защитных покрытий исключает необходимость очистки отходов и самих от-

ливок. Но использование огневых методов обрубки отливок и измельчения отходов сводит на нет эффект от применения защитных покрытий и инертных формовочных материалов.

Метод безотходной обрубки отливок на основе локального водородного охрупчивания мест соединения отливок с элементами ЛПС (см. § 11.3) позволяет также исключить вторичное загрязнение металла в зоне отделения ЛПС, обеспечить экономичную разделку на куски требуемых размеров бракованных отливок, толстостенных и крупных сплесов, остатков металла на лотке и гарнисажей плавильного тигля. Технологическая операция очистки отходов может быть выполнена на основе использования охрупчивающего действия водорода на литой металл перед механической очисткой его поверхности, например в галтовочных барабанах.

Способ разделки кусковых отходов титановых сплавов, основанный на использовании метода локального водородного охрупчивания металла, осуществляется путем высокотемпературного локального нагрева измельчаемых отходов концентрированным источником теплоты, например электрической дугой, в атмосфере водорода (рис. 11.12).

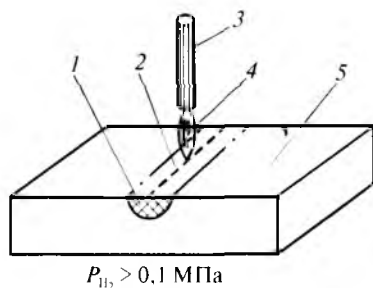


Рис. 11.12. Схема локального наводороживания (охрупчивания) литейных титановых отходов

Обрабатываемый материал помещается в вакуумно-водородную камеру, которая вакуумируется до остаточного давления 0,133 Па, а затем заполняется водородом до давления выше 0,4 МПа. Локальный нагрев (без плавления) куска отходов 5 производится электрической дугой, горящей между вольфрамовым электродом 3 и нагреваемым металлом 4. Электрод со скоростью 0,01–0,02 м/с перемещается по траектории 2, соответствующей линии разрушения куска, вдоль которой образуется зона водородного охрупчивания 1. Давление водорода в камере должно превы-

шать атмосферное, что позволяет предотвратить возможное натекание воздуха в камеру и избежать образования гремучей смеси.

В данном случае интенсивность наводороживания и связанного с ним охрупчивания зависит от количества аккумулируемой металлом теплоты и характера распределения температур в зоне нагрева. Низкая теплопроводность титана способствует локализации зоны нагрева, а резкий температурный перепад — развитию значительных внутренних напряжений. Этот процесс усиливает наводороживание, результатом чего является развитие сетки микротрещин на поверхности локально нагреваемого материала отходов.

Эффективность охрупчивания повышается при повторении процесса нагрева, причем в большей степени, если повторный нагрев осуществляется после почти полного охлаждения первоначально нагретого металла, так как повторный нагрев титана с низкой теплопроводностью, имеющего в своей структуре гидридную фазу, которая характеризуется слабым сцеплением с матрицей и большим удельным объемом, приведет к возрастанию внутренних напряжений.

На рис. 11.13 показано, как влияет на ударную вязкость число теплосмен при локальном нагреве пластины толщиной 10 мм из сплава ВТ5Л в атмосфере водорода при давлении 0,07 МПа. Ударная вязкость определялась на образцах, вырезанных из локально наводороженной пластины без надреза. Роль надреза играет локально наводороженная зона образцов.

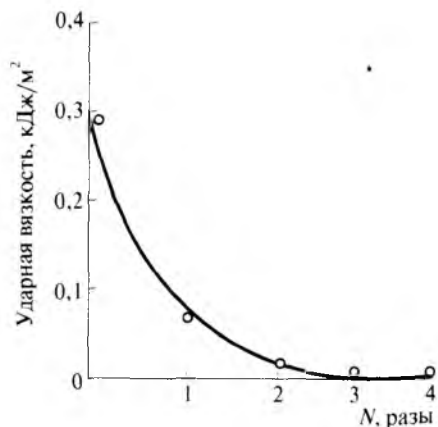


Рис. 11.13. Влияние числа тепловых воздействий N электрической дугой на плоский образец из сплава ВТ5Л в атмосфере водорода на ударную вязкость металла

Ударная вязкость при единичном нагреве снижается в 5 раз, после 2-кратного нагрева находится ниже предела хрупкости сплава, а после 3-кратного нагрева материал полностью теряет свою пластичность. Аналогичный результат достигается после двух теплосмен, если вторичный нагрев осуществлялся после почти полного охлаждения металла.

Способ разделки кусков титановых отходов с использованием их локального охрупчивания имеет следующие преимущества:

- ◇ минимально возможные энергетические затраты;
- ◇ сокращение расхода водорода по сравнению с объемным наводороживанием более чем в 10–20 раз;
- ◇ исключение операции вакуумной дегазации измельченных отходов перед повторным переплавом, так как среднеобъемное содержание водорода в кусках размером $60 \times 60 \times 20$ мм не превышает 0,01–0,005 % (по массе);
- ◇ исключение безвозвратных потерь дефицитного металла, характерных для огневой резки.

Некондиционные литейные титановые отходы составляют от 10 до 15 % наплавляемого металла и почти 20 % кондиционных титановых отходов. Они практически полностью не используются при производстве титановых отливок. Поэтому переработка некондиционных отходов позволит повысить эффективность литейного производства.

Как указывалось выше, толстостенные отходы (толщина более 3 мм) разделяют на куски, которые затем подвергаются поверхностной очистке перед их использованием в основном производстве. Эта операция является одной из основных в процессе переработки некондиционных титановых отходов.

Тонкостенные отходы, в которых глубина проникновения поверхностного загрязненного слоя сопоставима с половиной толщины стенки металла ($h \leq 1,5$ мм), а также стружку и опилки титановых сплавов следует перерабатывать в порошок методом гидрирования-дегидрирования, т.е. с использованием объемного гидрирования.

Особенностью некондиционных титановых отходов является наличие сетки микротрещин в поверхностном загрязненном слое. Наводороживание такого слоя существенно отличается от наводороживания свободной от трещин поверхности. Известно, что в титане, окружающем вершину развивающейся трещины, концен-

трация водорода примерно в 13 раз больше, чем в остальной части наводороженной зоны (рис. 11.14). В результате на границе металла с загрязненным слоем формируется зона повышенного содержания водорода («водородного облака») шириной d , определяемой условиями наводороживания.

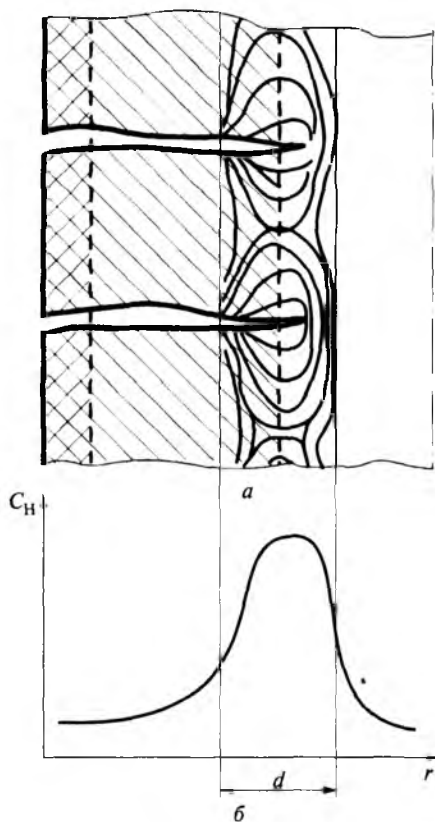


Рис. 11.14. Схема наводороживания некондиционных титановых отходов с сеткой микротрещин в поверхностном слое:

a — структура наводороженного поверхностного слоя; b — распределение содержания водорода в поверхностном слое

Таким образом, при наводороживании отходов появляется возможность с минимальными материально-энергетическими затратами получить охрупченный слой, расположенный непосредственно за загрязненной примесью внедрения поверхностной зоной. Их очистка значительно упрощается при последующей операции механического воздействия на литейные отходы в галтовочных барабанах или шаровых мельницах.

С целью локализации ширины охрупченной водородом зоны необходимо создавать высокие градиенты температуры, используя также низкую теплопроводность титана. Это достигается нагревом отходов до 550–600 °С в вакуумно-водородной печи с последующей передачей их из нагревательной зоны в охлаждающую, где обеспечивается охлаждение отходов до 400 °С со скоростью 20–25 К/мин. При загрузке отходов на поддонах слоем толщиной не более 50–60 мм общая длительность процесса наводороживания не превышает 10–12 мин.

Если необходимо, отходы могут подвергаться дегазации после очистки поверхности отходов в галтовочных барабанах или шаровых мельницах и последующего отсева. Однако очищенные отходы в количестве 30–70 % массы загрузки могут быть вовлечены в переплав без предварительной дегазации, поскольку среднее содержание водорода в очищенном металле не превышает 0,05–0,07 % (по массе) и весь водород при повторном вакуумном переплаве легко удаляется.

В результате гидрирования при температуре 650–700 °С содержание водорода в материале повышается до 3–3,5 % (по массе), что обуславливает резкое охрупчивание материала и возможность его измельчения в порошок в шаровых мельницах. Это свидетельствует о перспективности метода получения порошков из титановых отходов, основанного на объемном водородном охрупчивании металла.

Дегидрирование порошкообразных материалов проводится по известным режимам: температура 800 °С, остаточное давление $1,3 \cdot 10^{-3}$ Па и продолжительность 2,0–5,0 ч. Во избежание спекания порошка его перемешивают периодически или постоянно. Большой разброс в длительности операции дегидрирования порошков определяется их назначением как материала для дальнейшего использования, либо в виде гидрированных порошков титана с остаточным содержанием водорода от 0,5 до 1,2 % для приготовления защитно-модифицирующих водородо-содержащих покрытий литейных форм, либо в виде порошков титана; в последнем случае длительность дегидрирования максимальна.

11.5. Применение водородного пластифицирования титановых сплавов при горячем изостатическом прессовании

Одной из новых технологических операций упрочнения пористости в титановых отливках ответственного назначения является горячее изостатическое прессование (ГИП). Данный технологический процесс осуществляется следующим образом: 1) литые титановые детали помещают в специальную камеру (газостат), которую герметизируют и вакуумируют; 2) нагнетают в камеру аргон до определенного давления и осуществляют нагрев рабочего пространства до 900–1200 °С. С нагревом давление аргона в газостате возрастает; 3) выдерживают литые детали в газостате при заданных давлении и температуре в течение определенного времени (в среднем 2 ч). Под действием внешнего газового давления в результате классического деформирования металла внутренние участки в деталях (пористость, раковины) исчезают, улучшаются структура и механические свойства металла; 4) охлаждают газостат после выдержки, давление в камере стравливают и производят выгрузку деталей.

На рис.11.15 показана схема газостата. Камера высокого давления газостата представляет собой цилиндр из высокопрочной стали, обмотанный высокопрочной проволокой с остаточным напряжением. Напряженность конструкции настолько велика, что цилиндр даже при высоких внутренних давлениях находится в сжатом состоянии. Камера установлена в вертикальном положении. Через крышки с обоих торцов загружают детали, производят вакуумирование и напуск аргона в камеру. Осевое давление на крышки во время прессования аргоном воспринимается стальной рамой, которая выполнена подвижной для облегчения загрузки и выгрузки камеры. Камера с загруженными деталями устанавливается внутри рамы. Современные газостаты оборудованы камерами диаметром 150–1600 мм и высотой 350–3200 мм. Максимальное давление 100–200 МПа, температура ГИП до 1250 °С.

Применение водородного пластифицирования при обработке деталей в газостате значительно повышает ее эффективность благодаря увеличению пластичности металла в период проведения ГИП, снижению температуры, давления и продолжительности

операции, а также защиты металла от окисления. Одновременно сокращаются материально-энергетические затраты на проведение ГИП.

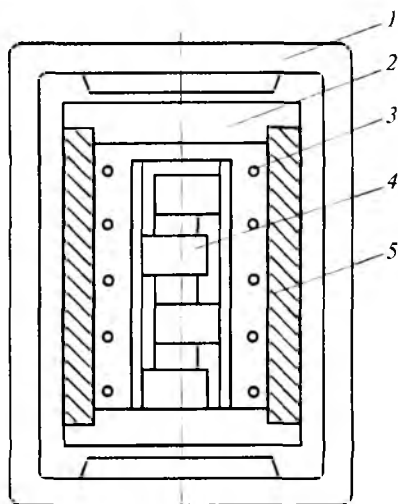


Рис. 11.15. Схема газостата:
1 – рама; 2 – крышка; 3 – нагреватель; 4 – обрабатываемая деталь;
5 – камера высокого давления

Перечисленные задачи решаются применением водорода как временного легирующего элемента, обладающего защитно-модифицирующими функциями и эффектом пластифицирования металла в условиях горячей деформации, т.е. оказывающего положительное комплексное воздействие на структуру и свойства сплавов.

Эффект водородного пластифицирования наиболее полно проявляется у сплавов на основе интерметаллида Ti_3Al , жаропрочных α -, псевдо- α - и $(\alpha + \beta)$ -титановых сплавов с крупнозернистой пластинчатой структурой и обусловлен высокой степенью завершения процесса динамической полигонизации менее прочной и более пластичной при температурах пластической деформации β -фазы, повышением ее объемной доли и снижением степени легирования, уменьшением объемной доли и дроблением пластин α - и α_2 -фаз, а также облегчением процесса их динамической рекристаллизации.

Использование эффекта водородного пластифицирования позволяет снизить температуру горячей обработки жаропрочных титановых сплавов на 80–200 °С, осуществлять их пластическую

ная вязкость и предел выносливости при изгибе σ_{-1} на базе 10^7 циклов нагружения.

Использование ГИП наиболее эффективно в режиме водородного пластифицирования для отливок из сплава ВТ5Л (табл. 11.4).

Таблица 11.4. Сравнительный анализ характеристик отливок из сплава ВТ5Л в литом состоянии (процесс 1), после гомогенизирующего отжига (процесс 2), после ГИП (процесс 3) и ГИП в режиме водородного пластифицирования (процесс 4)

Процесс	Содержание H_2 , % (по массе)	Механические свойства				Содержание O_2 , % (по массе)	Параметры структуры, мкм	
		σ_B , МПа	δ , %	KCU, МДж/м ²	σ_{-1} , МПа		β	α
1	0,007	765	12,6	0,6	226	0,15	384,2	2,88
2	0,008	686	16,3	0,87	206	0,15	1272,5	7,95
3	0,07	780	13,2	0,71	245	0,22	389,2	3,14
4	0,25	860	13,5	0,80	420	0,12	356	1,55

По сравнению с литым состоянием параметры структуры после вакуумного отжига укрупняются: размер β -зерна — в 3,3 раза, а толщина пластин выделений α -фазы внутри β -зерна — в 2,7 раза. Укрупнение структурных составляющих сплава в процессе отжига отливок при 900 °С в течение 1 ч обуславливает понижение прочности сплава и ухудшение его служебных характеристик, а также повышение пластичности и вязкости разрушения. Операция газостатирования отливок из α -титанового сплава ВТ5Л оказывает благоприятное влияние и в большей степени в режиме водородного пластифицирования на все показатели свойств сплава. Применительно к данному сплаву водород не только повышает пластичность в режиме изостатического прессования отливок, но и проявляет модифицирующее влияние на структуру металла. Выделения α -фазы имеют тонкодисперсную морфологию. По-видимому, значительная трансформация структуры сплава приводит к более существенным результатам при газостатировании отливок из α -титановых сплавов в режиме водородного пластифицирования.

По показателям физико-механических и эксплуатационных характеристик газостатированный металл не уступает деформированному металлу на нижнем пределе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как водород влияет на свойства титана? Раскройте сущность водородной технологии производства слитков и отливок из титановых сплавов.
2. На какие технологические процессы производства титановой продукции водород оказывает положительное влияние?
3. Почему при использовании водородной технологии водород часто называют временным легирующим компонентом?
4. Иногда для уменьшения химического взаимодействия материала литейной формы с титаном на внутреннюю поверхность наносят покрытие, состоящее из мелкодисперсных гидрированных порошков титана. Объясните принцип действия такого покрытия. Какой достигается эффект?
5. В чем заключаются достоинства способа безотходного отделения литников и прибылей от отливок? Составьте схему установки наводороживающих элементов в литейную форму.
6. В чем заключается принцип действия горячего изостатического прессования титановых сплавов?
7. Как водород воздействует на металл при горячем изостатическом прессовании? За счет чего резко повышается эффективность обработки отливок в подобных газостатах?

ГЛАВА 12 ДЕФЕКТЫ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ

12.1. Классификация дефектов

В общем машиностроении доля отливок, используемых в качестве заготовок для изготовления деталей различных машин и агрегатов, составляет по номенклатуре 65–70 %. Поэтому качество машиностроительной продукции в значительной степени определяется качеством отливок, которое характеризуется уровнем их дефектности.

Дефекты — это несоответствие отливки одному или нескольким параметрам, которые установлены для нее техническими параметрами. Отливки, имеющие хотя бы один дефект, являются дефектными. Дефекты подразделяют на явные и скрытые.

Явным является дефект, обнаруживаемый при визуальном контроле, или дефект, для выявления которого в нормативной документации предусмотрены соответствующие методы и средства контроля. Несмотря на невозможность визуального обнаружения, такой дефект является явным, так как при использовании предписанной методики контроля он будет, безусловно, обнаружен.

Скрытым является дефект, не обнаруживаемый при указанных выше условиях и не выявляемый предусмотренными методами контроля. Скрытые дефекты иногда выявляются в процессе механической обработки либо в процессе эксплуатации машины или агрегата, а также при дополнительном контроле инструментальными средствами, не предусмотренными в технологических картах методами. Наиболее опасная ситуация возникает в случае, когда скрытый дефект проявляется в процессе эксплуатации машиностроительной продукции, что может вызвать аварийную обстановку.

В литейных цехах в зависимости от технического уровня, культуры производства, метода литья, химического состава сплава и

ряда других факторов брак отливок колеблется в пределах 1–10 %, а по ряду сложных по конфигурации отливок процент брака значительно выше.

В зависимости от степени поражения дефектами отливки подразделяют на четыре группы:

- 1) годные, полностью отвечающие всем установленным требованиям технической документации и стандартов;
- 2) условно годные, которые имеют небольшие отклонения от установленных требований, не оказывающие существенного влияния на эксплуатационные показатели отливки, такие отливки допускаются к дальнейшей обработке;
- 3) исправимый брак – отливки, имеющие один или несколько устраняемых дефектов, после исправления которых они допускаются для дальнейшей обработки и использования по назначению;
- 4) неисправимый брак – отливки, имеющие такие дефекты, исправление которых технически невозможно или экономически нецелесообразно.

Данной классификацией пользуются технические работники службы контроля при решении вопросов разбраковки отливок. Однако такая классификация не отражает причин возникновения дефектов в отливках. Поэтому разработаны другие принципы классификации дефектов, оценивающих их природу и причины возникновения.

Так, при литье цветных сплавов в большинстве случаев применяют классификацию дефектов по причинам их образования, по общности физико-химических явлений, в результате которых дефект образуется в отливке.

Все дефекты отливок подразделяют на четыре основные группы:

Первая группа – дефекты, образующиеся вследствие физико-химического взаимодействия металла с газами атмосферы и материалом литейной формы. К этой группе относятся: газовые раковины и поры, пригар, изменение химического состава сплава в поверхностных слоях отливки и др.

Вторая группа – дефекты, образующиеся в отливках в результате усадочных процессов, получающие развитие в период затвердевания сплава и его охлаждения до комнатной температуры. К этой группе относятся: внутренняя и внешняя усадочные рако-

вины, усадочная пористость, горячие и холодные трещины, коробление отливок и др.

Третья группа дефектов — неметаллические включения в металле отливок — шлаковые и флюсовые частицы, зерна формовочной смеси, ужимины и др.

Четвертая группа — дефекты, приводящие к несоответствию техническим условиям и стандартам химического состава сплава, физических и механических свойств, структуры сплава и несоответствие чертежу размеров и конфигурации отливки.

Основными причинами образования дефектов являются несовершенство технологического процесса, нарушение технологии, недоброкачественность технологических материалов и нетехнологичность конструкции литой детали.

Наиболее распространены дефекты, вызванные несовершенством технологического процесса изготовления отливки и нарушением технологии в процессе ее изготовления.

Дефекты, перечисленные выше, встречаются в отливках на титановых сплавах, причем из-за специфики ряда свойств титана и условий формирования отливки в поле действия центробежных сил наиболее характерны дефекты первой и четвертой групп классификации.

На образование дефектов влияют такие специфические свойства титана, как: высокая химическая реакционная способность в жидком состоянии; резкое изменение механических свойств в результате растворения в металле продуктов химического взаимодействия; высокая температура литья; низкий коэффициент теплопроводности.

На образование и степень развития в отливках ряда дефектов оказывает влияние и центробежный способ заполнения литейной формы расплавом.

В отливках из титановых сплавов наиболее часто встречаются следующие дефекты:

- ◇ газонасыщенный поверхностный слой с измененными механическими свойствами и структурой;
- ◇ пригар на поверхности отливок;
- ◇ дефекты, вызванные нарушением режима течения расплава по каналам формы, — неспай, неслитины;
- ◇ газовые раковины и пористость.

12.2. Газонасыщенный поверхностный слой

Образующийся на отливках из титановых сплавов поверхностный слой металла существенно отличается по структуре и механическим свойствам от остального металла отливок. От его качества зависят механические свойства и служебные характеристики литой детали.

Во-первых, в результате высокой химической активности титановых сплавов металл отливки в период ее формирования неизбежно вступает в химическое взаимодействие с материалом литейной формы и выделяющимися из нее газами, что приводит к растворению продуктов реакции в поверхностном слое отливки и изменению структуры и свойств металла в этом слое.

Во-вторых, на поверхности отливки формируется шероховатость, которая зависит от ряда факторов и в первую очередь от гранулометрического зернового состава формовочной смеси и метода изготовления литейной формы.

В-третьих, при определенных тепловых условиях формирования отливки на ее поверхности образуется пригар, который резко изменяет качество металла.

Образующийся в отливках газонасыщенный (или альфированный) поверхностный слой (ГПС) с измененной структурой и иными механическими свойствами, пригар и шероховатая поверхность отливки оказывают отрицательное влияние на конструкционные и эксплуатационные свойства литых деталей, а также на ряд технологических операций, например на обрабатываемость резанием, обработку давлением и др.

В качестве примера на рис. 12.1 приведены результаты усталостных испытаний образцов из сплава ВТ5Л с литой поверхностью и после удаления ГПС механической обработкой. Наличие в поверхностном слое отливки ГПС снижает предел усталости металла на 25–30 %; с увеличением глубины ГПС предел усталости металла уменьшается.

Применяемые для изготовления литейных форм формовочные смеси на основе углеродных и керамических материалов и современные технологии изготовления и подготовки форм к заливке (сушка, обжиг, нанесение покрытий и др.) не обеспечивают необходимую химическую инертность по отношению к титановым

сплавам. В связи с этим в результате физико-химического взаимодействия металла отливки с материалом формы ее поверхностный слой насыщается вредными примесями (кислород, углерод, азот, водород, кремний и др.). Содержание примесей в поверхностном слое отливок может в несколько раз превышать допустимые значения, вследствие чего пластичность металла в этом слое резко снижается, а прочность и твердость — возрастают.

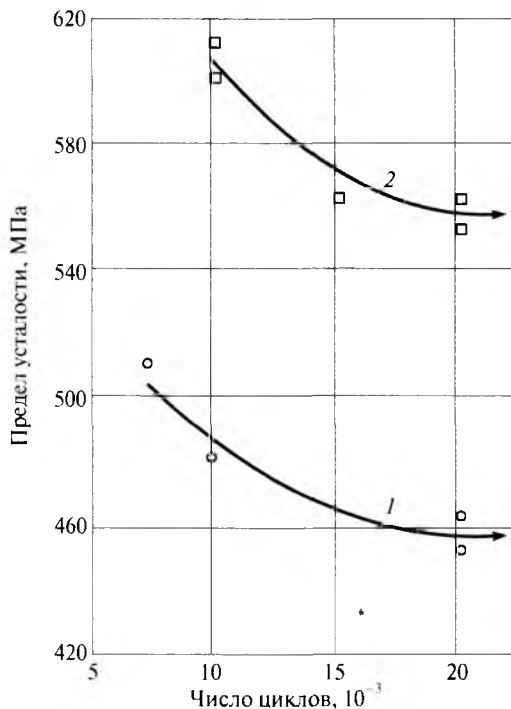


Рис. 12.1. Изменение предела усталости при растяжении–сжатии литых (кривая 1) и механически обработанных (кривая 2) образцов из сплава ВТ5Л

На рис. 12.2 представлены данные о влиянии ряда элементов, содержащихся в поверхностном слое отливки, на прочностные и пластические свойства титана, а на рис. 12.3 — изменение микротвердости в поверхностном слое отливок из сплава ВТ5Л, полученных в литейных формах из различных формовочных смесей.

Из этих данных следует, что при изготовлении отливок в керамических формах толщина ГПС и масса содержащихся в этом слое примесей примерно в 3–5 раз больше, чем при использовании графитовых форм.

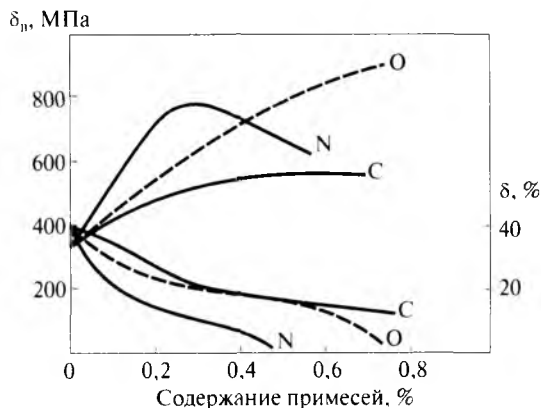


Рис. 12.2. Влияние кислорода, азота, углерода на механические свойства титана

Глубина распространения ГПС в тело отливки, а также количество растворенных в этом слое примесей определяется температурой на контактной поверхности отливка—форма и кинетикой выделения газов из материала формы к контактной поверхности.

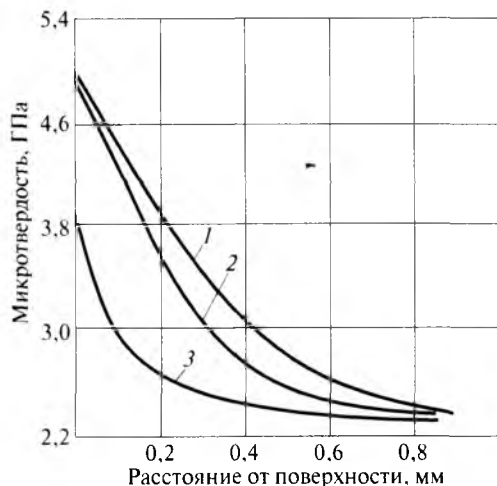


Рис. 12.3. Изменение микротвердости в поверхностном слое отливок из сплава ВТ5Л, полученных в корундовых (кривая 1), магниитовых (кривая 2) и графитовых (кривая 3) формах

Газообразные продукты, выделяющиеся из материала формы в период формирования отливки, являются основным источником образования ГПС в титановых отливках, изготовленных в графитовых формах (см. гл. 10).

Температура на контактной поверхности отливка—форма зависит от таких факторов, как температура литья, теплофизиче-

ские свойства литейной формы, геометрические размеры рассматриваемого элемента или сечения отливки, время течения жидкого металла в период заполнения формы через рассматриваемый элемент или сечение отливки.

Большинство отливок из титановых сплавов получают в формах, изготовленных различными методами (прессованием, по выплавляемым моделям, набивкой и др.) из графитовых формовочных смесей, теплофизические свойства которых незначительно различаются. В связи с особенностями гарнисажной плавки температура литья титановых сплавов практически всегда остается в пределах 1800–1900 °С. Поэтому оба этих фактора реально не могут существенно изменять температуру на контактной поверхности при прочих неизменных условиях и их влияние на формирование ГПС всегда остается примерно постоянным.

Влияние геометрических размеров отливки на изменение микротвердости в поверхностном слое отливок представлено на рис. 12.4. Отливки изготовлялись из сплава BT5Л в графитовой форме. Для сравнения такие же отливки были выполнены в магнетитовой форме (рис. 12.5).

Изготавливаемая отливка — это ступенчатая цилиндрическая экспериментальная проба, элементы которой имели следующие диаметры: 3, 9, 18 и 27 мм. Из приведенных данных следует, что с увеличением радиуса элемента отливки глубина распространения ГПС и максимальная микротвердость металла в этом слое возрастают.

Глубина залегания загрязненного поверхностного слоя в отливке, полученной в керамической форме, составляет 0,5 мм, а максимальная твердость металла в поверхностном слое отливки в 2 раза выше, чем в ее средней части. В отливках, полученных в графитовой форме, толщина ГПС не более 0,2 мм, а максимальная твердость в 1,3–1,5 раза выше, чем в средней части отливки. Ясно, что графитовые формы по сравнению с керамическими являются более инертными по отношению к титану.

С увеличением диаметра элементов ступенчатой пробы глубина залегания загрязненного слоя и масса растворенных в этом слое примесей возрастают, что непосредственно связано с тепловыми условиями на контактной поверхности. С увеличением диаметра отливки температура на контактной поверхности возрастает, что сопровождается ростом количества выделяющихся

из формы газов и увеличением продолжительности и активности физико-химического взаимодействия металла отливки с формой.

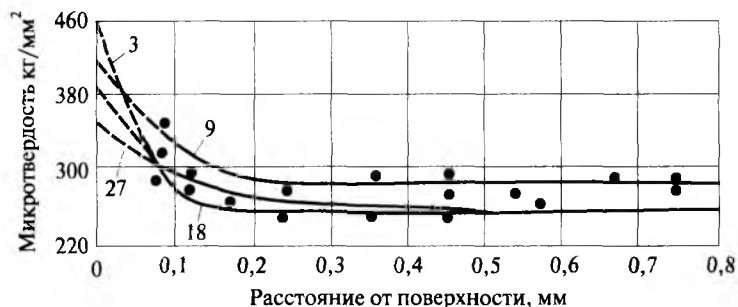


Рис. 12.4. Изменение микротвердости поверхностного слоя отливок из сплава ВТ5Л, залитых в формы из графитовой формовочной смеси (цифры у кривых — диаметр элементов ступенчатой пробы, мм)

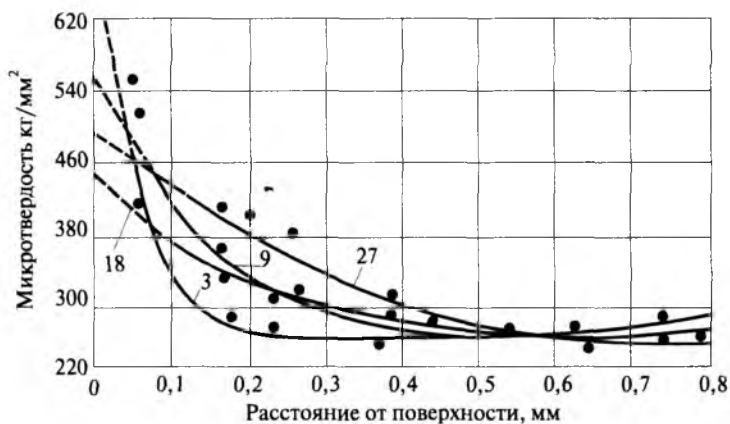


Рис. 12.5. Изменение микротвердости поверхностного слоя отливок, залитых в магнезитовые формы

При центробежном литье титановых сплавов расплав заливается во вращающуюся литейную форму. Частота вращения центробежного стола, на котором укреплен контейнер с литейными формами, составляет 200–300 об/мин. Возникающие центробежные силы значительно увеличивают скорость движения жидкого металла по каналам литейной формы, что способствует улучшению ее заполняемости. При этом некоторые поверхности отливок

под действием центробежных сил плотно прижимаются к поверхности литейной формы, а между другими поверхностями отливки и формы возникает зазор (см. рис. 12.6).

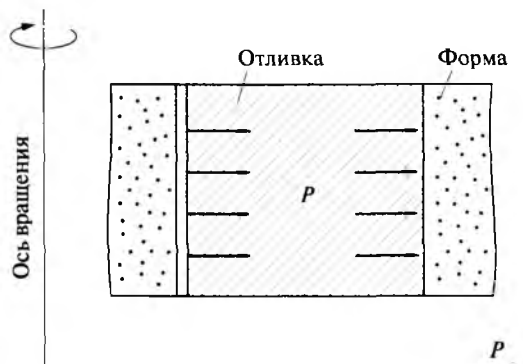


Рис. 12.6. Схема действия центробежных сил на взаимное расположение поверхностей отливки и формы

В данном случае интенсивность физико-химических процессов между отливкой и формой будет зависеть от расположения рассматриваемой поверхности в пространстве относительно оси вращения центробежного стола.

Если между отливкой и формой образовался зазор, часть выделяющихся из формы газов будет удаляться через зазор во внешнюю среду, а парциальное давление газов в зазоре уменьшится. Кроме того, отсутствие плотного контакта металла с формой снижает температуру на контактной поверхности и полностью исключает химическое взаимодействие металла с материалом формы, что особенно важно при изготовлении отливок в керамических формах. По этим причинам качество поверхностного слоя отливки оказывается более высоким, чем поверхностного слоя, который под действием центробежных сил плотно прилегает к поверхности формы.

Центробежная сила P зависит от числа оборотов центробежного стола n и расстояния рассматриваемого сечения отливки от оси вращения r :

$$P = 0,056\gamma\left(\frac{n}{100}\right)^2 r^2 + \gamma h, \quad (12.1)$$

где γ — удельный вес жидкого металла; h — высота столба жидкого металла под рассматриваемым сечением отливки.

На рис. 12.7 представлены данные о микротвердости в поверхностных слоях отливки (на расстоянии 0,5 мм от поверхности отливки) из сплава ВТ5Л, изготовленной в графитовой литейной форме.

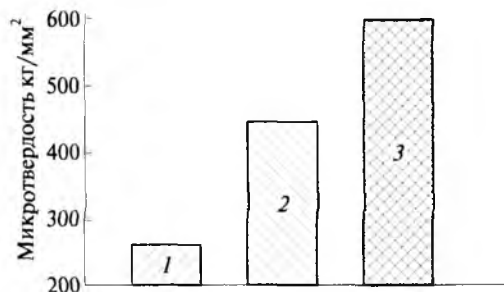


Рис. 12.7. Влияние расположения поверхности отливки относительно оси вращения на микротвердость в поверхностном слое отливки из сплава ВТ5Л:

1 — в средней части отливки; 2 — в слое, обращенном к оси вращения; 3 — в слое металла, плотно прилегающего к поверхности литейной формы

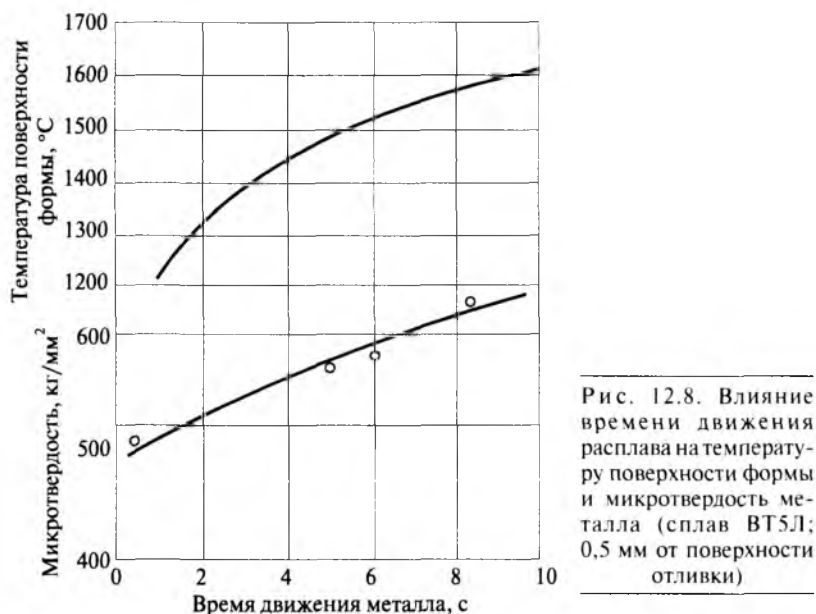
Результаты измерения микротвердости образцов показали, что те поверхности отливок, которые плотно прилегают под действием центробежной силы к литой форме, насыщаются примесями в наибольшей степени.

При изготовлении крупногабаритных отливок продолжительность заполнения рабочей полости литейной формы возрастает. Обычно в этом случае время течения жидкого металла через сечение отливки, расположенное рядом с питателем литниковой системы, увеличивается, что приводит к повышению температуры на контактной поверхности отливка—форма в данном сечении. Повышение температуры неизбежно сопровождается усилением физико-химического взаимодействия металла отливки с газообразными продуктами, выделяющимися из материала литейной формы.

На рис. 12.8 представлены результаты исследования, показывающие влияние времени течения металла на изменение микротвердости в поверхностном слое и температуры поверхности отливки, из которых следует, что с увеличением времени течения металла через рассматриваемое сечение отливки качество поверхностного слоя существенно ухудшается: возрастают твердость металла и глубина залегания альфированного слоя.

Альфированный слой на титановых отливках с повышенной твердостью и низкой пластичностью создает благоприятные условия для образования холодных трещин, возникновению которых способствует низкая теплопроводность титана. Установлено, что

вероятность образования холодных трещин сильно возрастает по мере увеличения содержания примесей (кислорода, водорода, азота и др.) в поверхностном слое отливки.



В то же время титановые сплавы не склонны к образованию горячих трещин из-за низкого коэффициента линейного расширения и невысокого эффективного интервала кристаллизации.

Анализ причин, вызывающих образование в поверхностном слое титановых отливок альфированного слоя, позволяет определить основные мероприятия, направленные на повышение качества металла в поверхностном слое отливок.

Поэтому основные мероприятия должны быть направлены на предупреждение образования холодных трещин. В первую очередь необходимо обеспечить формирование поверхностного слоя отливки с минимальным загрязнением металла примесями. Кроме того, при разработке технологии изготовления отливки не следует допускать резких переходов от тонких сечений к массивным, предусматривать соответствующие радиусы закруглений на внутренних углах, применение стержней из податливых материалов, снижение скорости охлаждения отливок.

При изготовлении отливок в графитовых формах необходимо добиваться снижения газотворности форм, подготовленных к заливке расплавом. С этой целью изготовленные формы подвергают высокотемпературному обжигу. Выбор режима обжига в зависимости от требований к качеству поверхностного слоя отливок следует осуществлять по номограммам (см. рис. 10.16). В § 10.2 даны подробные сведения о влиянии различных технологических факторов на газотворность графитовых форм.

Подогрев литейных форм до 200–300 °С перед их заливкой расплавом снижает газотворность форм благодаря удалению физически сорбированных газов из материала литейной формы и тем самым повышает качество поверхностного слоя отливок.

Радикальным средством борьбы с образованием альфированного слоя являются газозащитные покрытия, наносимые на рабочую поверхность литейных форм как из графитовых, так и из керамических формовочных материалов. Входящий в состав покрытия порошок титана под действием теплоты, выделяемой металлом, нагревается и поглощает выделяющиеся из формы газы, не допуская их к поверхности отливки (см. гл. 10).

При разработке технологии изготовления отливок из титановых сплавов следует также учитывать, что качество металла в поверхностном слое зависит от положения отливки относительно оси вращения центробежного стола и режима заполнения формы расплавом (см. рис. 12.6).

Если в процессе формирования отливки был нарушен режим заполнения литейной формы расплавом, могут возникнуть условия, при которых интенсивность физико-химического взаимодействия металла с материалом формы резко возрастает и в поверхностном слое отливки образуется не только альфированный слой, но и пригар.

12.3. Пригар на поверхности отливок

Пригаром называют слой на поверхности отливки, состоящий из частиц формовочных материалов и металла. На поверхности титановых отливок пригар образуется в результате механического проникновения жидкого металла в поры литейной

формы под действием капиллярных сил и давления жидкого металла, создаваемого центробежными силами, на стенки литейной формы. Этот слой прочно удерживается на поверхности отливки.

Образование пригара сопровождается формированием на поверхности отливки альфированного слоя, который по глубине распространения в тело отливки и по содержанию примесей превосходит аналогичные параметры альфированного слоя, обычно встречающиеся в отливках из титановых сплавов. В ряде случаев пригар является неисправимым дефектом, такие отливки бракуются.

На рис. 10.2 представлены две возможные схемы процесса затвердевания металла, которое начинается с момента поступления расплава в рассматриваемое сечение формы во время ее заполнения. Ввиду высокой интенсивности охлаждения металла и низкой теплопроводности титана на поверхности формы практически мгновенно (менее 1 с) образуется тонкий слой (корка) затвердевшего металла, который исключает непосредственный контакт жидкого металла с поверхностью формы.

При развитии процесса затвердевания по варианту I на схеме рис. 10.2 жидкий металл на всем этапе затвердевания не вступает в непосредственный контакт с формой и в этом случае пригар на поверхности отливки не образуется.

Если через рассматриваемое сечение формы в период ее заполнения протекает большое количество металла, то первоначально образовавшаяся корка затвердевшего металла расплавляется и жидкий металл вступает в непосредственный контакт с поверхностью формы (см. рис. 10.2, вариант II). К этому моменту температура поверхности формы оказывается нагретой до высокой температуры (см. рис. 10.1). При температуре поверхности графитовой формы выше 800 °С краевой угол смачивания титановым сплавом равен 0°. В этом случае жидкий металл под действием капиллярной силы и центробежного давления проникает в поры поверхностного слоя формы, образуя на поверхности пригар, состоящий из смеси зерен графита и металла.

Процесс затвердевания металла, развивающийся по варианту II (см. рис. 10.2), приводит не только к образованию пригара, но и к более интенсивному химическому взаимодействию металла с ма-

териалом формы и газами, выделяющимися из нее все в большем количестве в связи с повышением температуры формы. В результате под слоем пригара образуется альфированный слой с повышенным содержанием примесей и распространяется в отливку на значительное расстояние.

Время расплавления первично образовавшейся корки твердого металла на рабочей поверхности литейной формы в зависимости от физических свойств сплава, формы и ряда технологических параметров можно определить на основе общей теории теплопроводности.

Образование пригара происходит при условии

$$\tau_{\text{пл}} < \tau_{\text{зап}}, \quad (12.2)$$

где $\tau_{\text{пл}}$ — время плавления первично образовавшейся корки затвердевшего металла в рассматриваемом сечении отливки, с; $\tau_{\text{зап}}$ — время течения металла через рассматриваемое сечение в период заполнения формы расплавом, с.

Время плавления корки затвердевшего металла определяют по уравнению

$$\sqrt{\tau_{\text{пл}}} = \frac{\sqrt{\pi \lambda_1 q_{\text{кр}} \rho_1}}{2\sigma_2 \alpha (t_{\text{м}} - t_{\text{кр}})} \left[\sqrt{1 + \frac{8\sigma_2^2 (t_{\text{кр}} - t_{2\text{н}})}{\pi \lambda_1 q_{\text{кр}} \rho}} - 1 \right], \quad (12.3)$$

где $t_{\text{кр}} = (t_{\text{лик}} + t_{\text{сол}})/2$ — средняя температура кристаллизации сплава, °С; λ_1 — теплопроводность твердого металла, Вт/(м·К); ρ_1 — удельный вес твердого металла, кг/м³; $q_{\text{кр}}$ — удельная теплота кристаллизации металла, Дж/кг; σ_2 — коэффициент аккумуляции теплоты формой, Вт·с^{1/2}/(м²·К); α — коэффициент теплоотдачи от потока жидкого металла к корке затвердевшего металла, Вт/(м²·К); $t_{\text{м}}$ — средняя температура жидкого металла в рассматриваемом сечении, °С; $t_{2\text{н}}$ — начальная температура формы, °С.

Коэффициент α вычисляют по уравнению

$$\text{Nu} = 0,15 \text{ Re}^{0,4}, \quad (12.4)$$

где

$$\text{Nu} = \alpha X_1 / \lambda_1^1; \text{ Re} = \omega X_1 / a_1^1; \quad (12.5)$$

X_1 — приведенный размер отливки в рассматриваемом сечении, м; ω — скорость течения металла, м/с; λ_1^1 — теплопроводность жидко-

го металла, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; a_1^1 — температуропроводность жидкого металла, $\text{м}^2/\text{с}$.

Расчет по (12.2)–(12.5) позволяет определить агрегатное состояние поверхностного слоя отливки, контактирующего с поверхностью формы, при различных технологических параметрах.

На рис. 12.9–12.11 представлены зависимости времени расплавления первично образовавшейся корки титана $\tau_{\text{пл}}$ от скорости движения металла через рассматриваемое сечение начальной температуры перегрева жидкого металла. Кривые 1 построены для сечения отливки толщиной $\delta = 6$ мм, а кривые 2 — для $\delta = 4$ мм.

Теплофизические величины для титана и формы были приняты следующие: $\sigma_2 = 3600 \text{ Вт}\cdot\text{с}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $\rho_1 = 4500 \text{ кг}/\text{м}^3$; $q_{\text{кр}} = 419\,000 \text{ Дж}/\text{кг}$; $\lambda_1 = 20 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\lambda_1^1 = 22 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $a_1^1 = 4,9\cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

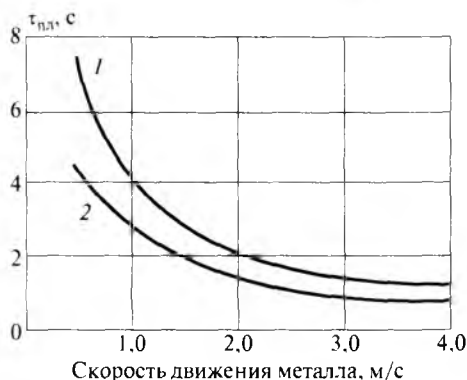


Рис. 12.9. Зависимость времени расплавления корки затвердевшего титана от скорости движения металла при перегреве жидкого металла выше $t_{\text{кр}}$ на 100°C и $t_{2\text{н}} = 25^\circ\text{C}$

Время расплавления корки $\tau_{\text{пл}}$ на поверхности формы в период течения жидкого металла сопоставимо с временем заполнения форм при литье титановых сплавов, а в ряде случаев меньше его. Следовательно, в начальный период заполнения формы расплавом на ее поверхности практически мгновенно (менее 1 с) образуется корка затвердевшего металла, которая изолирует форму от контакта с жидким металлом. Однако при определенных условиях (см. рис. 10.2, б) корка расплавляется и жидкий металл вступает в непосредственный контакт с поверхностью формы, температура которой к данному моменту становится очень высокой (см. рис. 9.10). При этом возникают условия для интенсификации физико-химических процессов между металлом и формой, кото-

рые в большинстве случаев приводят к образованию пригара на поверхности титановых отливок.



Рис. 12.10. Зависимость времени расплавления корки затвердевшего титана от начальной температуры формы $t_{2н}$ при $\omega = 1$ м/с и $\Delta t_{пер} = 100$ °C

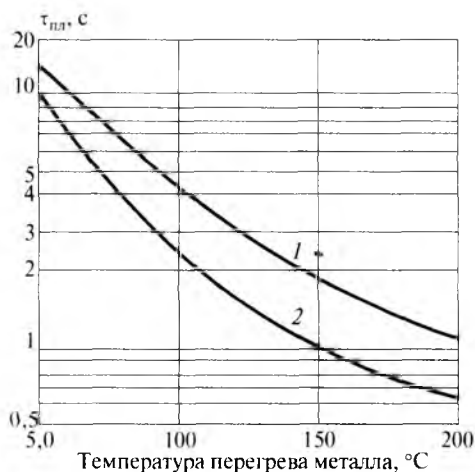


Рис. 12.11. Зависимость времени расплавления корки затвердевшего титана от температуры перегрева металла выше температуры кристаллизации при $\omega = 1$ м/с и $t_{нач} = 25$ °C

Для предотвращения образования пригара условия заливки формы должны быть такими, чтобы не происходило расплавление затвердевшей корки металла. Это явление наблюдается в тех местах полости формы, где протекает недопустимо большое количество жидкого металла во время заливки. Установлено, что при литье титановых сплавов в уплотняемые графитовые формы с начальной температурой 20 °C образовавшаяся первоначально корка расплавится, если через рассматриваемое сечение при заполнении расход металла будет больше критического m_c , кг/см².

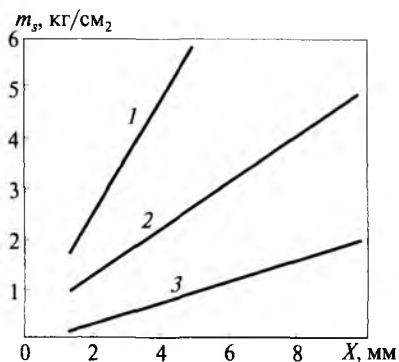


Рис. 12.12. Зависимость m_s от характерного размера сечения канала графитовой формы X при перегреве жидкого титана:

1 – 70 °C; 2 – 100 °C; 3 – 150 °C

На рис. 12.12 дана зависимость m_s от приведенного размера сечения канала X при разных перегревах жидкого металла выше температуры кристаллизации, откуда следует, что для предотвращения образования пригара расход жидкого металла через любое сечение графитовой формы не должен превышать $m_s = 2,0\text{--}2,5$ кг/см².

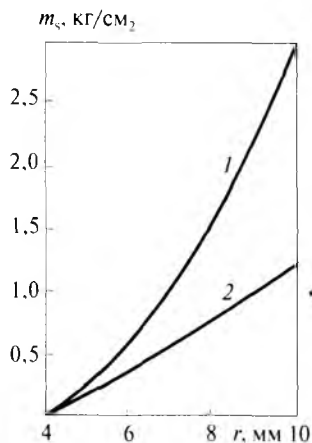


Рис. 12.13. Зависимость m_s для элемента отливки с $X_1 = 10$ мм, контактирующего с графитовым стержнем от его радиуса r при перегреве металла:

1 – 100 °C; 2 – 150 °C; время заливки 0,5 с

Высока вероятность образования пригара во внутренних полостях отливки, которые оформляются с помощью стержней из графитовой смеси. На рис. 12.13 представлены данные, показывающие зависимость m_s от радиуса стержня r , установленного в элементе титановой отливки, имеющей приведенный размер $X_1 = 10$ мм. Анализ кривых показывает, что практически невозможно получение отверстий радиусом менее 5–6 мм, свободных

от пригара. С увеличением перегрева сплава и уменьшением проходного сечения в отливке m_s уменьшается, что необходимо учитывать при разработке технологии литья.

12.4. Шероховатость поверхности отливок

Качество литой поверхности отливок, определяемое степенью шероховатости, оказывает непосредственное влияние на механические свойства литых деталей, особенно на усталостные характеристики металла, а также на их эксплуатационные и технологические свойства.

На рис. 12.14 представлены данные о влиянии шероховатости на ударную усталость литых образцов из легированной стали.

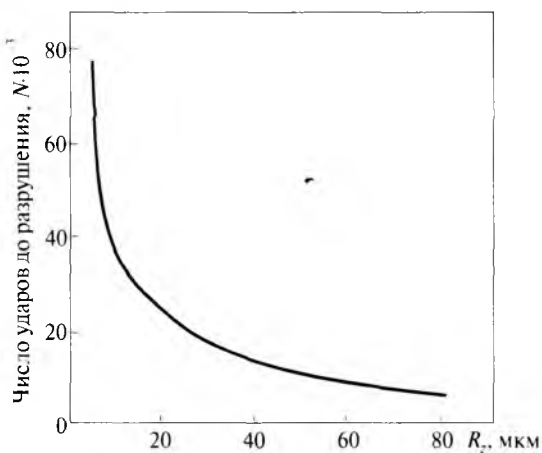


Рис. 12.14. Влияние шероховатости поверхности отливки на ударную усталость

Подобная зависимость механических свойств от шероховатости литой поверхности наблюдается у большинства конструктивных сплавов, в том числе титановых. Допустимая шероховатость титановой отливки регламентируется для поверхностей, не подлежащих механической обработке, требованиями технических условий и чертежа в соответствии с ГОСТ 2789–73.

Шероховатость поверхности отливки зависит прежде всего от гранулометрического состава формовочной смеси и метода изго-

товления формы. На формирование шероховатости поверхности отливки в условиях действия центробежных сил оказывают влияние также такие факторы, как расположение рассматриваемой поверхности в пространстве относительно оси вращения, кинетика затвердевания поверхностного слоя, интенсивность газовыделения из литейной формы.

На рис. 12.15 представлена схема, иллюстрирующая контакт жидкого металла с поверхностью формы, которая позволяет проанализировать влияние различных параметров на формирование шероховатости.

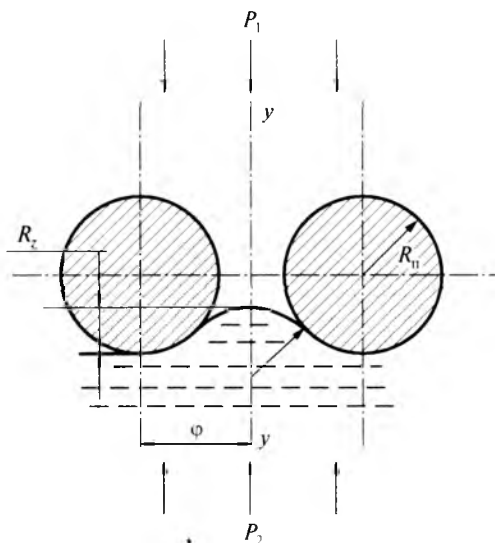


Рис. 12.15. Схема контакта жидкого металла с поверхностью формы:

$R_{\text{г}}$ — средний радиус зерен графитового порошка; ϕ — параметр, характеризующий плотность упаковки зерен графита в поверхностном слое формы; R_z — высота микронеровности на поверхности отливки; R_m — радиус мениска металла, вдавливающегося в поверхностные поры формы; P_1 и P_2 — давления, действующие по оси y — y на поверхностный слой жидкого металла

Давления P_1 и P_2 определяются как

$$P_1 = P_{\text{г}} + P_{\text{к}}; P_2 = P_{\text{ц}} + P_{\text{м}},$$

где $P_{\text{г}}$ — давление, создаваемое газами, выделяющимися из формы; $P_{\text{к}}$ — капиллярное давление; $P_{\text{ц}}$ — давление металла на поверхность форм, создаваемое центробежной силой; $P_{\text{м}}$ — металлостатическое давление.

Анализ процессов, происходящих на контактной поверхности жидкий металл — форма (рис. 12.15), показывает, что шероховатость R_z определяется следующими технологическими параметрами:

- ◇ размерами зерен графитового порошка $R_{п}$;
- ◇ плотностью упаковки зерен графита ϕ , которая в свою очередь зависит от условий изготовления литейной формы (прессование, набивка и др.);
- ◇ расположением поверхности отливки в пространстве и ее расстоянием от оси вращения центробежного стола. Оба этих фактора влияют на давление $P_{ц}$;
- ◇ газотворностью литейной формы, с увеличением которой возрастает давление P_r .

В табл. 12.1 представлены результаты измерения высоты микронеровностей R_z на поверхности отливок из сплава ВТ5Л, полученных в формах по выплавляемым моделям, набивных и оболочковых формах. Исследуемые поверхности отливок находились на расстоянии 0,35 м от оси вращения центробежного стола в различных координатных плоскостях: $x-y$, $x-z$ и $y-z$ (см. рис. 9.8). Частота вращения стола 200 об/мин.

Таблица 12.1. Средние высоты микронеровности R_z на поверхности титановых отливок из сплава ВТ5Л ($n = 200$ об/мин, $R = 0,35$ м)

Координатная плоскость	R_z , мкм		
	Набивные формы	По выплавляемым моделям	Оболочковые формы
$x-y$	31,2	27,6	25,7
$x-z$	31,0	27,7	28,5
$y-z$	55,1	32,6	38,6

Поверхности отливок, расположение которых в пространстве совпадает с координатной плоскостью $y-z$ (задняя стенка по ходу вращения), имеют наибольшую шероховатость из-за повышенного давления жидкого металла на эти поверхности формы при центробежном литье. Шероховатость передней поверхности стенки отливки по ходу вращения на 15–25 % ниже, чем у задней поверхности, если данная стенка отливки располагается относительно оси вращения в координатной плоскости $y-z$.

Из табл. 12.1 также следует, что гранулометрический состав материала формы оказывает влияние на шероховатость поверхности отливок: наибольший размер графитовых зерен в формовочной смеси, предназначенной для изготовления набивных форм, а наименьший — в формовочной смеси, используемой для изготовления форм по выплавляемым моделям.

Ниже приведены средние значения шероховатости R_z поверхности титановых отливок, которые наблюдаются в промышленных отливках в зависимости от метода изготовления литейной формы:

<i>Метод изготовления</i>	R_z , мкм
Набивные графитовые	80–20
Оболочковые графитовые	40–20
Прессованные графитовые	40–20
Графитовые по выплавляемым моделям	40–10
Металлические кокили	40–10

Таким образом, если техническими условиями на отливку предусмотрено, что ее литая поверхность, не подвергаемая механической обработке, должна иметь невысокую шероховатость, то следует выбирать соответствующий метод изготовления литейной формы, а при разработке технологии изготовления отливки располагать ее относительно оси вращения так, чтобы положение литой поверхности в пространстве совпадало с координатными плоскостями x — y или x — z и она находилась на возможно наименьшем расстоянии от оси вращения.

12.5. Пористость и газовые раковины

В отливках, изготавливаемых из большинства промышленных сплавов, образуются дефекты газового происхождения — пористость и раковины.

Принято считать, что причиной образования газовой пористости являются газы, растворимые в металле, которые при охлаждении жидкого металла и его затвердевании выделяются в виде мелких газовых пузырьков и «застревают» в затвердевающем металле отливки. В некоторых сплавах в жидком виде могут проте-

кать химические реакции, продуктом которых является газовая фаза, например $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$. Образующиеся пузырьки газа могут остаться в металле из-за начавшегося его затвердевания и вызвать образование газовой пористости.

Причиной образования газовых раковин является механическое выделение пузырьков газа в жидкий металл из внешней среды (литейная форма, газовая атмосфера) в периоды заполнения формы расплавом и охлаждения жидкого металла.

Газовые поры и раковины ухудшают эксплуатационные свойства литых деталей и снижают механические свойства сплава.

Методы борьбы с газовыми дефектами определяются природой их образования в отливках. Так, в отливках из титановых сплавов в некоторых случаях образуется газовая пористость, но, как правило, причиной образования газовых дефектов в титановых отливках является механическое внедрение выделяющихся из формы газов в жидкий металл.

Хорошо известно, что большая группа технически важных металлов — железо, никель, алюминий, магний, медь, цинк и др. — и сплавов на их основе склонна к образованию газовой пористости в отливках и слитках. Причиной образования газовой пористости служит растворенный в металле водород, который выделяется из него при понижении температуры жидкого металла и особенно интенсивно в процессе затвердевания.

Все мероприятия по борьбе с газовой пористостью в отливках из перечисленных выше металлов и сплавов на их основе в основном направлены на предотвращение образования пузырьков водорода в затвердевающем металле. С этой целью снижают содержание водорода в жидком металле перед его разливкой по формам, а также изменяют условия охлаждения металла в форме, чтобы в металле образовался пересыщенный раствор водорода.

Титан и ряд других элементов относится к группе металлов, которые взаимодействуют с водородом по экзотермической реакции с положительным тепловым эффектом, т.е. с повышением температуры растворимость водорода в металле уменьшается. При переходе титана из жидкого состояния в твердое в отличие от металлов первой группы растворимость водорода скачкообразно возрастает, поэтому выделения водорода из металла в виде пузырьков обычно не происходит.

Исследованиями [19] установлена зависимость растворимости водорода ($[H]$, $\text{см}^3/100 \text{ г}$, от температуры T , К, и парциального давления водорода p_{H_2} , Па:

◇ для твердого титана

$$\lg [H]_{\text{ТВ}} = 2730/T + 0,28 + 0,235 \lg p_{\text{H}_2};$$

◇ для жидкого титана

$$\lg [H]_{\text{ж}} = 2460/T + 0,36 + 0,235 \lg p_{\text{H}_2}.$$

При температуре плавления 1665°C и давлении 1013 ГПа равновесное содержание водорода составляет $1350 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ для твердого титана и $1180 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ для жидкого титана, т.е. при переходе титана из жидкого состояния в твердое растворимость водорода скачкообразно повышается. На рис. 12.16, а дана кривая растворимости водорода в титане.

Таким образом, при охлаждении титана (давление постоянное) пересыщенный раствор водорода не образуется и по этой причине пористость в отливках не может возникнуть. Однако следует учитывать, что отливки из титановых сплавов формируются в условиях действия центробежных и гравитационных сил, которые могут привести к возникновению в металле зон пониженного давления.

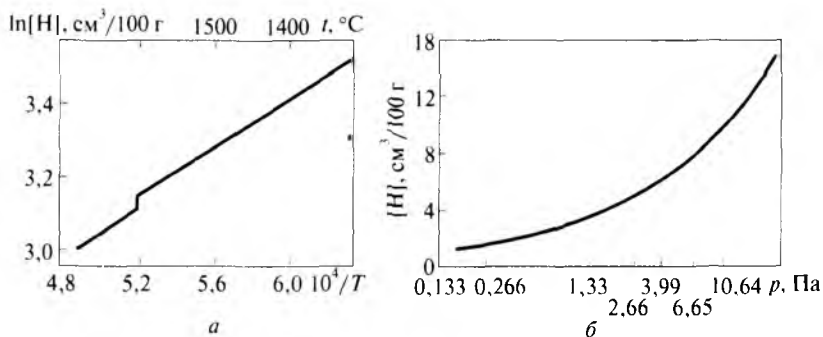


Рис. 12.16. Зависимость растворимости водорода от температуры при $p = 1013 \text{ ГПа}$ (а) и от давления при 1800°C (б)

Растворимость водорода в титане зависит также от давления (см. рис. 12.16). В промышленных титановых сплавах содержание водорода в среднем составляет $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ металла. При этой кон-

центрации водорода образуется пересыщенный раствор при давлении до 2,66 Па, а при давлении 1,33 Па из раствора должно выделяться водорода 1,5 см³/100 г металла.

Все это позволяет [16] сделать вывод о возможном механизме образования газовой пористости в отливках из титановых сплавов. Местом зарождения газового пузырька в металле являются зоны пониженного давления в жидком металле — зеркало расплава, кавитационные пустоты и др. В этих зонах в результате резкого снижения давления раствор водорода в металле оказывается пересыщенным, происходит его распад и выделение водорода в виде пузырьков.

Если скорость охлаждения жидкого металла высока, то развивающийся процесс затвердевания фиксирует газовый пузырек водорода в металле и в конечном итоге приводит к образованию в отливках газовой пористости.

Радикальным методом борьбы с газовой пористостью следует считать мероприятия, направленные на снижение содержания водорода в расплаве перед его разливкой по формам. К таким мероприятиям относятся: использование для плавки шихты с низким содержанием водорода, повышение температуры расплава перед его заливкой в формы, снижение давления газов в плавильной камере плавильно-заливочной установки. Заполнение форм при стационарной заливке расплава не приводит к образованию газовой пористости, так как при этом давление в жидком металле во всех зонах отливки примерно одинаково и определяется только металлостатическим напором.

В большинстве случаев фасонного литья образование газовых дефектов связано с механическим внедрением выделяющихся из формы газов в металл формирующейся отливки [16]¹.

Возможность внедрения газовых пузырьков в металл создается при условии

$$P > P_{\text{м}} + P_{\text{п}}, \quad (12.6)$$

где P — избыточное газовое давление на границе металл—форма; $P_{\text{м}}$ — давление металла отливки на стенку формы; $P_{\text{п}}$ — давление,

¹ Бииков Е.Л., Надежин А.М. Образование газовых раковин в отливках из титановых сплавов // Прогрессивные процессы и материалы в литейном производстве : сб. науч. трудов. Ярославль, 1979.

развиваемое пузырьком газа при преодолении сопротивления поверхностных сил жидкого металла или сопротивления затвердевшего тонкого слоя металла на поверхности отливки.

Известно, что графитовые формы обладают достаточно высокой газотворностью. Как следует из зависимости газовыделения из графитовой формы (рис. 12.17) от температуры, интенсивность газовыделения достигает максимальных значений при низких температурах (100–200 °С) и затем при высоких (1000–1250 °С). Первый пик газовыделения связан с выделением физически сорбированных газов, а второй – с выделением хемосорбированных газов, а также газообразных продуктов, выделяющихся из связующего. Химический анализ газов, выделяющихся из формы при низких температурах (рис. 12.18), показывает, что это преимущественно азот и кислород (кривые 1 и 2).

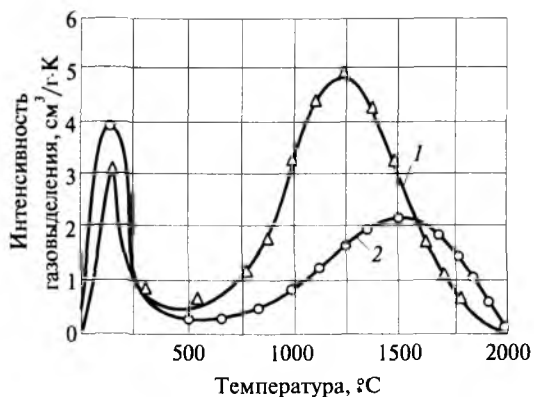


Рис. 12.17. Дифференциальная зависимость газовыделения из графитовых форм после их обжига при температуре 1100 °С в автогенерируемой атмосфере (кривая 1) и вакууме (кривая 2)

При «взрывном» характере газовыделения физически сорбированных газов газовое давление в порах поверхностных слоев формы достигает значения, рассчитанного по (12.6).

Как показывает анализ кинетики затвердевания фасонных отливок (рис. 10.2), к моменту начала выделения физически сорбированных газов с поверхностью формы контактирует либо жидкий металл, либо тонкая корка затвердевшего металла. В этот период газовые пузырьки проникают в тело отливки и вызывают образование внутренних газовых раковин (рис. 12.19). Часть газовых раковин может уноситься потоком жидкого металла и исчезать в результате растворения газов в титановом сплаве.

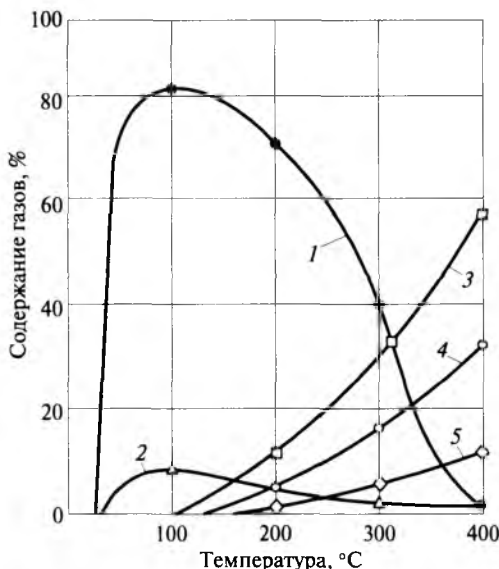


Рис. 12.18. Состав выделяющихся газов из графитовых форм, прошедших обжиг при температуре 1100 °С в автогенерируемой атмосфере:

1 — N₂; 2 — O₂; 3 — CO; 4 — H₂; 5 — C₂H₂



Рис. 12.19. Газовая раковина в отливке × 400

При литье тонкостенных отливок ($X \leq 5$ мм) время затвердевания металла мало, поэтому внедрившиеся в металл газы не успевают полностью раствориться и отливка при определенных условиях поражается газовыми раковинами. Однако газ, находящийся в раковине, частично растворяется в окружающем его металле, что подтверждается замерами микротвердости от края газовой раковины в глубь металла (рис. 12.20).

Известно, что азот наиболее резко увеличивает твердость титановых сплавов, в связи с чем внедрение в отливку выделяющихся из формы физически сорбированных газов, состоящих в основном из азота, приводит к значительному изменению твердости металла, прилегающего к газовой раковине.

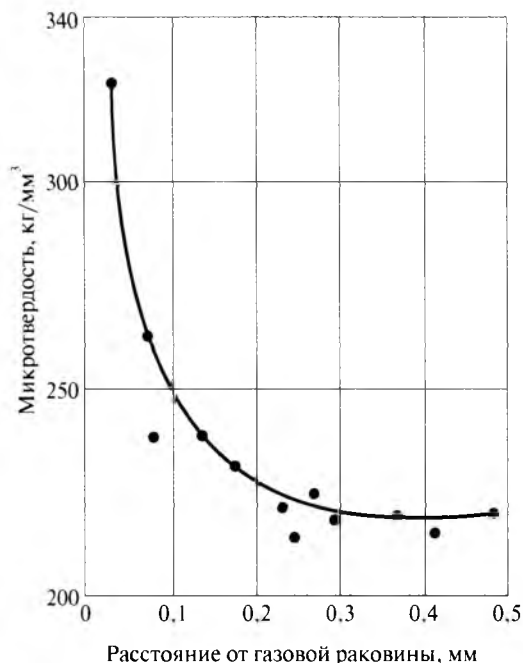


Рис. 12.20. Изменение микротвердости в слое металла, прилегающего к газовой раковине

Второй пик газовой выделения (рис. 12.17) не приводит к образованию газовых раковин в отливках, так как газовое давление на границе металл—форма в этом случае относительно невелико, а к моменту достижения наибольшего газового давления отливка в большинстве случаев находится в твердом состоянии.

Таким образом, радикальные методы борьбы с газовыми раковинами в отливках из титановых сплавов предполагают проведение мероприятий, которые либо исключают процесс выделения физически сорбированных газов из форм в период формирования отливок либо создают повышенное давление металла на стенки формы P_m .

Исключение газовой выделения физически сорбированных газов достигается несложным технологическим приемом — подогревом литейных форм перед заливкой до 200–300 °С. В этом случае отливки не поражаются газовыми раковинами. Одновременно уменьшается содержание примесей в поверхностном слое отливки, о чем свидетельствуют результаты измерения микротвердости (рис. 12.21).

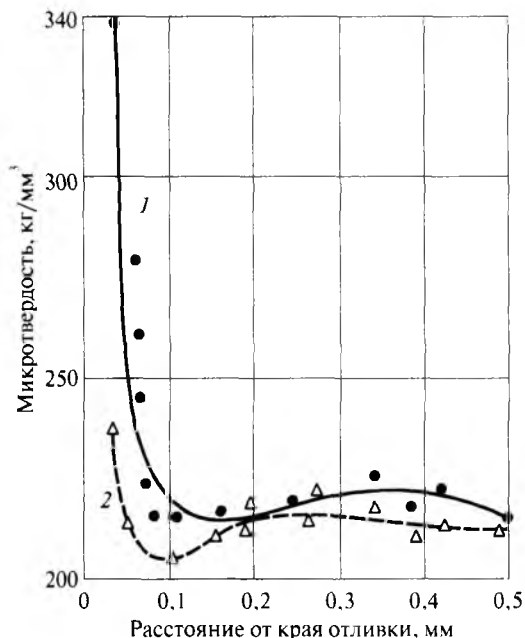


Рис. 12.21. Изменение микротвердости поверхности отливки из сплава ВТ1Л:

1 — без предварительного подогрева формы; 2 — предварительный подогрев формы до 250 °С; толщина стенки 3 мм

Применение вакуумно-компрессионного метода литья также способствует резкому снижению интенсивности образования газовых раковин, так как при этом возрастает давление металла на форму, ускоряется процесс растворения внедрившихся газов в металле и уменьшается объем оставшихся в отливке газовых раковин.

12.6. Дефекты, вызванные нарушением режима заполнения форм расплавом

Для изготовления отливок из титановых сплавов используют метод центробежной заливки расплава с вертикальной осью вращения, позволяющий создать на этапе заполнения формы повышенную скорость потока жидкого металла и тем самым обеспечить полное заполнение формы жидким металлом.

Однако применение центробежного метода литья связано с такими особенностями, как сложность обеспечения плавного ввода жидкого металла в полость литейной формы; неравномерность

условий заполнения и затвердевания различных частей отливки, расположенных на неодинаковом расстоянии от оси вращения. Эти особенности приводят к образованию в отливках ряда дефектов, которые особенно распространены в крупногабаритных и тонкостенных отливках. К таким дефектам относятся неспаи, неслитины, незаполнение отдельных полостей формы расплавом. Наиболее часто в отливках образуются неспаи.

Неспаем называют сквозную или поверхностную с закругленными краями щель или углубление в теле отливки, образованные неслившимися потоками преждевременно затвердевшего металла.

Образование в титановых отливках дефектов в виде неспаев обусловливается высокой интенсивностью охлаждения жидкого металла в период заполнения формы и низкой теплопроводностью титана.

Неспаи распространяются в тело отливки на различную глубину. По внешнему виду неспая не удастся судить о глубине его залегания. Поэтому все неспаи, отмеченные на отливке, подлежат устранению зачисткой, а неспаи, залегающие глубоко, разделявают и заваривают.

Механизм образования неспаев связан с нарушениями режима течения металла по каналам литейной формы — отсутствием сплошности потока, пульсацией металла, заполнением рабочей полости формы несколькими потоками жидкого металла и т.п.

По происхождению неспаи делят на три рода.

Неспаи первого рода — продольные и поперечные неспаи. Для таких дефектов характерно то, что слои металла, прилегающие к дефекту, имеют одинаковый химический состав и структуру металла. Эти неспаи представляют собой зафиксированные в процессе затвердевания несплошности потока жидкого металла, которая неизбежно возникает в условиях центробежного литья. Неспаи образуются при неполном слиянии потоков жидкого металла, струйном или пульсирующем характере течения металла, разбрызгивании и т.п.

Меры предупреждения образования неспаев первого рода направлены прежде всего на сохранение компактности металлического потока в полости литейной формы. Кроме того, при разработке литниковой системы следует по возможности стремиться исключить заполнение рабочей полости формы несколькими потоками жидкого металла.

Образование неспаев первого рода можно избежать путем: повышения температуры жидкого металла, увеличения скорости заполнения, уменьшения скорости охлаждения металла путем предварительного подогрева литейной формы.

К неспаям второго рода относятся углубления в поверхностном слое отливки, имеющие вид складок или расслоений. Для неспаев второго рода характерно, что в металле, прилегающем к дефекту, повышено содержание элементов, входящих в состав материала формы (рис. 12.22).

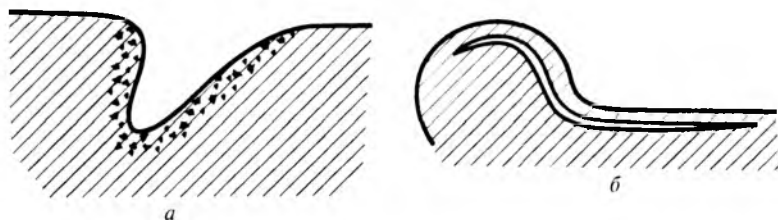


Рис. 12.22. Характерный вид неспаев второго (а) и третьего рода (б)

Образование неспаев второго рода связано с протеканием последовательно развивающихся процессов: 1) образование в период заполнения на поверхности литейной формы корки затвердевшего металла; 2) расплавление первично образовавшейся корки металла, происходящее только в тех сечениях отливки, в которых расход жидкого металла превышает критическое значение ($m_s = 2,0-2,5 \text{ кг/см}^2$); 3) интенсивное физико-химическое взаимодействие металла с материалом формы в том сечении отливки, где произошло расплавление корки. Металл в этом сечении в результате химического и механического взаимодействия загрязняется элементами и частицами материала формы; 4) повторное образование на поверхности формы в рассматриваемом сечении корки затвердевшего металла; 5) под действием центробежных сил и давления, создаваемого газами, выделяющимися из формы, участки затвердевшей корки заглубляются (вдавливается) в жидкий металл.

Для предупреждения образования неспаев второго рода полезны следующие мероприятия:

- ◇ непревышение расхода жидкого металла через любое сечение формы критического значения ($m_s = 2,0-2,5 \text{ кг/см}^2$) в период заполнения литейной формы расплавом;

- ◇ подогреть литейных форм перед их заливкой до 200–400 °С с целью частичной их дегазации и уменьшения газового давления на металл;
- ◇ увеличение давления в жидком металле, что при центробежном литье достигается соответствующим выбором расположения отливки относительно оси вращения. На рис. 12.23 представлена зависимость давления P в жидком металле от радиуса вращения r для частоты вращения центробежного стола $n = 200$ об/мин (кривая 1) и $n = 300$ об/мин (кривая 2).

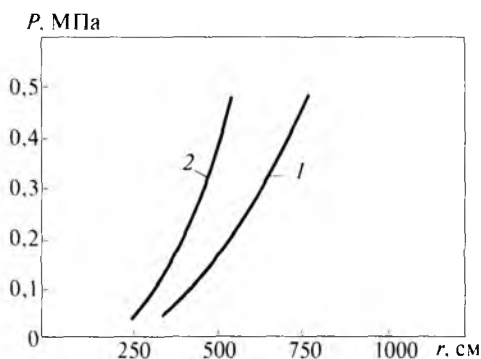


Рис. 12.23. Зависимость давления жидкого металла на стенки формы от частоты n и радиуса вращения r

Неспаи третьего рода нередко представляют собой своеобразную шелевую несплошность, повторяющую контур отливки и отстоящую от поверхности на 2–3 мм (рис. 12.22, б). Такие неспаи являются следствием прерывистого или периодического заполнения формы жидким металлом и неодинакового давления металла на поверхности формы, расположенные на различных расстояниях от оси вращения центробежного стола (рис. 12.23). Процесс образования неспаев третьего рода в отливках из титановых сплавов состоит из двух этапов:

- 1) жидкий металл заполняет рабочую полость формы и на поверхности формы образуется тонкий слой затвердевшего металла. Под действием давления жидкого металла образовавшаяся корка плотно прижимается к поверхности формы;
- 2) в самом тонком сечении отливки (например, в питателе) металл полностью затвердевает, вследствие чего исчезает действие давления жидкого металла, создаваемое металлостатическим напором и центробежными силами на жидкий металл, находящийся в рабочей полости формы. Жидкий металл в рабочей полости формы

под действием центробежной силы отходит от поверхности формы, расположенной ближе к оси вращения, образуя тонкую щелевую несплошность между коркой затвердевшего металла и жидким металлом, которая при полном затвердевании металла остается в теле отливки.

Методы борьбы с образованием несплавов третьего рода направлены на соблюдение принципов неразрывности потока жидкого металла в период заполнения рабочей полости формы и соблюдение направленности и последовательности затвердевания металла в условиях действия центробежных сил.

12.7. Методы контроля дефектов в отливках

Цель контроля составляют выявление дефектов в отливках и определение соответствия химического состава, механических свойств, структуры и геометрии отливок требованиям технических условий и чертежа. Контролю могут подвергаться и готовые отливки, и технологические процессы их изготовления. Методы контроля подразделяют на разрушающие и неразрушающие.

Разрушающий контроль может производиться как на специальных образцах, отливаемых одновременно с отливкой, так и на образцах, вырезанных из различных участков контролируемой отливки. Последнее применяется при доводке технологического процесса или при контрольно-приемочных испытаниях. В этом случае становится невозможным дальнейшее использование отливки по назначению. Разрушающие методы контроля предусматривают определение химического состава и механических свойств металла отливок, изучение его макро- и микроструктуры, пористости и т.п.

Неразрушающий контроль не влияет на дальнейшую работоспособность отливок, и они остаются полностью пригодными к эксплуатации. К неразрушающим методам контроля относятся: измерение размеров и шероховатости поверхности отливки, визуальный осмотр их поверхности, рентгеновский, ультразвуковой, люминесцентный и другие специальные методы контроля.

Литые титановые детали применяются, как правило, в ответственных узлах и агрегатах различных машин, и по этой причине контролю отливок и параметров технологического процесса их производства уделяется большое внимание. На долю контрольных операций приходится до 15 % затрат при производстве титановых отливок. Контролируются химический состав сплава, механические свойства литого металла, внешние и внутренние дефекты отливок, ее геометрические размеры и шероховатость поверхности. Контролю также подвергается ряд этапов технологического процесса изготовления отливок.

Химический состав сплава в отливках контролируют на содержание легирующих компонентов и примесей. Как известно, он зависит от химического состава расходных электродов и литейных отходов, вовлекаемых в плавку. Поэтому контроль химического состава литого металла обычно проводят от группы плавки, в которых использовали одну партию расходных электродов и одну партию отходов с известным содержанием легирующих компонентов и примесей.

Контроль сплава на содержание углерода проводят от каждой плавки, так как плавка металла проводится в графитовых гарнисажных тиглях и содержание углерода в металле может изменяться от плавки к плавке.

Содержание примесей (кислород, азот, водород) в выплавляемом металле зависит от герметичности плавильной камеры печи. В случае ее нарушения контроль на содержание примесей внедрения проводят от первой плавки после ремонта печи.

Для определения содержания легирующих компонентов и примесей используют квантометр типа ДФС-41, а для контроля содержания кислорода, водорода и азота — приборы ЕАО-201, ЕАН-202, ЕАН-14 соответственно.

Механические свойства литого металла — предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, поперечное сужение и ударную вязкость — контролируют после каждой плавки, испытывая стандартные образцы, вырезанные из брусков, отливаемых вместе с отливками, или из элементов литниковой системы.

В процессе освоения технологии изготовления отливки контролируют также твердость поверхностного слоя отливки и структуру металла.

Отливки после выбивки из форм подвергаются тщательному визуальному контролю. Для титанового литья специфичным является контроль поверхности отливок с целью выявления неспавов. Для их обнаружения применяют лупы, а в сложных случаях — люминесцентный контроль. Посредством визуального контроля обнаруживают также такие дефекты, как незаливов, места образования пригара и повышенной шероховатости, наружные раковины, поверхностные засоры.

Внутренние дефекты в титановых отливках — раковины, поры, засоры — выявляют с помощью рентгеноскопии. Для этой цели применяют рентгеновские аппараты типа РУП-150/300-10.

Контроль геометрии отливок и шероховатости их поверхности не отличается от подобного контроля отливок из других сплавов.

Большое влияние на качество отливок (геометрическая точность, качество поверхности) оказывают исходные формовочные материалы — графитовый порошок и связующее. Исходный графитовый порошок контролируют на зольность. Содержание золы не должно превышать 0,8 %, а влажность не должна быть выше 1 %. Зерновой состав графитового порошка определяют на приборе 029. Зерновой состав должен соответствовать нормам, установленным в технологических инструкциях на данную формовочную композицию.

В органических связующих контролируют сухой остаток, плотность и вязкость. Для контроля готовых уплотняемых графитовых смесей на прочность, газопроницаемость, осыпаемость применяют стандартные методики и приборы марок 084М, 042М, 056М.

Тепловая обработка графитовых форм тщательно контролируется посредством измерения параметров температурного режима.

Особенно большой объем контроля различных параметров проводится при вакуумной гарнисажной плавке титановых сплавов. До начала плавки контролируют герметичность рабочей камеры установки и остаточное давление. Контроль натекания должен производиться не реже одного раза в смену. Кроме того, натекание проверяют после каждого, даже незначительного ремонта камеры печи или вакуумной системы.

До начала плавления и во время плавки контролируют наличие охлаждающей жидкости и ее давление на входе и выходе систем охлаждения всех узлов установки (тигель, электрододержа-

тель, камера, охлаждение вакуумных насосов и т.п.). Обычно средства контроля параметров работы гарнисажной установки являются встроенными.

В ходе приварки электрода и его плавления контролируют параметры электрической дуги — силу тока и напряжение. Для этой цели применяются наряду с показывающими приборами записывающие контрольные приборы. В этот период также обязателен контроль температуры охлаждающей жидкости с помощью записывающих приборов.

В процессе плавления необходимо контролировать изменение давления с целью своевременного обнаружения разгерметизации установки (попадание в камеру воды, оплавление токоподводов, возникновение неплотностей и т.п.). Обычно во время слива металла из тигля резко повышается остаточное давление, однако такое повышение является нормальным и не носит аварийного характера.

До начала слива металла включают центробежную машину. Для контроля частоты вращения стола обычно применяют вольтметр типа М-4200.

Сигналы многих приборов контроля плавки воспринимаются не только плавильщиком, но и передаются на исполнительные механизмы. Так, по сигналам внезапного повышения давления в камере, падения давления охлаждающей жидкости или недопустимого повышения ее температуры осуществляется немедленное выключение электрической дуги. Целый комплекс контрольных операций выполняют устройства автоматического ведения процесса плавки.

При освоении новых технологических процессов и номенклатуры литья, а также нового оборудования применяют различные дополнительные виды контроля и соответствующую аппаратуру.

12.8. Исправление дефектов титановых отливок

Дефекты, обнаруженные в отливках, удаляют высверливанием, фрезерованием, вырубкой зубилами или шарошками из сверхтвёрдого сплава на всю глубину дефекта. Кромки после вырубки тщательно зачищают. Если при удалении дефекта

толщина отливки уменьшается до недопустимого по техническим условиям предела, производят заварку дефектов аргонодуговой сваркой в специальной заварочной камере, наполненной чистым аргонном.

Перед заваркой поверхность отливки в зоне вырубки зачищают для удаления загрязненного поверхностного слоя на расстоянии не менее 10 мм от разделки. Глубина зачистки зависит от толщины загрязненного поверхностного слоя и в большинстве случаев должна быть не менее 1,0–2,0 мм. Выполняя разделку под сварку, учитывают, что толщина загрязненного поверхностного слоя отливки от внутренних стержней больше, чем от наружной части формы. Как правило, глубина разделки отливки должна ограничиваться так, чтобы под разделкой оставался слой металла толщиной 2–4 мм. В большинстве случаев это позволяет предупредить брак при разделке (сквозные отверстия) и исключить вредное влияние загрязненного слоя на металл шва.

Угол разделки мест вырубки должен быть не менее 60–70°. Только в тех случаях, когда после удаления дефектного металла образуется неглубокая канавка с отношением ширины к глубине не менее 2:1, допускается уменьшение угла разделки под заварку до 30° (15° на каждую сторону).

После разделки под заварку, выполненной зубилом, проводят дополнительную зачистку разделки корундовыми кругами до полного удаления неровностей, забоин и грубых рисок глубиной более 0,5 мм. Если место разделки в отливке недоступно для зачистки наждачным камнем, необходимо тщательно промыть его спиртом, просушить и затем оплавить поверхность вырубки аргонодуговой сваркой (без присадки, т.е. холостым проходом). К заварке можно приступить только в том случае, если при этом на оплавленной поверхности отливки не появится трещин и раковин. При появлении трещин или раковин производят дополнительную рубку, промывку и повторную проверку качества разделки оплавлением, после чего участки, подлежащие заварке, тщательно зачищают стальной щеткой, промывают растворителем для обезжиривания и просушивают.

Как присадочные материалы используют проволоку или электроды повышенной чистоты по содержанию примесей. Объем заварки дефектов ограничивается и не может быть более определен-

ного предела. При значительном объеме заварки, а также при исправлении деталей ответственного назначения рекомендуется после заварки проводить термическую обработку отливок по специальной инструкции для снятия сварочных напряжений.

Качество заварки дефектов проверяют внешним осмотром, рентгенопросвечиванием, люминесцентным контролем. В месте заварки должны отсутствовать видимые трещины, поры, наплывы и подрезы, а также обнаруживаемые рентгеноконтролем трещины, надрывы и раковины. Если при контроле качества исправленного участка в отливке вновь будут обнаружены дефекты, превышающие допустимые по техническим условиям, разрешается проведение повторных операций исправления отливок, как описано выше.

При заварке несквозных дефектов, если толщина остающегося под разделкой слоя «здорового» металла менее 8 мм, необходимо принимать меры для защиты обратной стороны шва от окисления, например посредством местного поддува инертного газа (аргона или гелия). Заварку сквозных дефектов производят на медной подкладке.

Наплавленный металл (особенно если он окислен с поверхности) зачищают стальной щеткой, а при сильном окислении — корундовым кругом. После зачистки наплавленного металла кратеры швов тщательно заделывают, а места перехода от наплавленного металла к основному сглаживают наложением галтелей путем оплавления границы шва аргонодуговой сваркой без присадочного материала.

В последние годы для «залечивания» некоторых внутренних несплошностей в теле титановых отливок применяют процесс горячего изостатического прессования (ГИП). С этой целью используют газостат (см. рис. 11.15). Основной частью газостата является камера высокого давления диаметром от 150 до 1600 мм и высотой до 3200 мм. В камеру загружаются отливки и нагнетается аргон; аргон и отливки в камерах могут нагреваться до 1250 °С, а давление — достигать 200 МПа.

Газостатирование титановых отливок приводит к «залечиванию» 80–90 % дефектов, обнаруженных рентгеноскопией. Не залечиваются две группы дефектов — дефекты, имеющие связь с поверхностью отливки; дефекты подкоркового расположения. Та-

кие дефекты разгерметизируются в процессе газостатирования из-за прорыва корки твердого металла.

Для «залечивания» раковин температуру инертного газа поддерживают на уровне ниже температуры полиморфного превращения на 15–20 °С для данного сплава. Выбор оптимального давления основывается на значениях предела текучести сплава при температуре ГИП (табл. 12.2).

Газостатирование не только «залечивает» внутренние несплошности в отливке, но и повышает механические свойства металла (см. табл. 12.3).

Оптимальные параметры газостатирования позволяют повысить предел усталости металла более чем в 2 раза.

Наиболее сильное влияние ГИП оказывает на механические свойства в том случае, когда происходит «залечивание» внутренних дефектов газового и усадочного происхождения.

Таблица 12.2. Предел текучести титановых сплавов $\sigma_{0,2}$ при различных температурах, °С

Сплав	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа			
	800	900	1000	1100
BT5Л	108	64	35	23
BT6Л	113	70	36	25
BT9Л	217	90	43	27
BT20Л	216	106	55	30

Таблица 12.3. Механические свойства, полученные на образцах до ГИП и после ГИП

Сплав	Состояние образца	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²
BT5Л	Литье до ГИП	834	19,0	27,7	59
		851	17,4	34,6	71
BT9Л	Литье после ГИП	955	8,3	17,4	31
		986	10,4	20,3	39

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На какие группы подразделяются все отливки по виду брака и степени пораженности дефектами?
2. На какие четыре группы подразделяются все дефекты, образующиеся в отливках из титановых сплавов?
3. Какие виды дефектов титановых отливок связаны со специфическими свойствами титана? Назовите эти свойства.
4. Объясните причину образования поверхностного слоя титановых отливок, который по механическим свойствам резко отличается от остальных частей.
5. Какие технологические факторы ухудшают качество поверхностного слоя титановых отливок?
6. Предложите технологические решения по совершенствованию процесса изготовления отливок с целью повышения качества их поверхностного слоя.
7. Назовите основную причину образования пригара на поверхности титановых отливок.
8. Объясните причину образования пригара на поверхности отливок, если в реальных условиях соблюдается соотношение $\tau_{\text{ли}} < \tau_{\text{ад}}$.
9. Какие технологические параметры влияют на шероховатость поверхности отливок?

Библиографический список

1. *Аношкин Н.Ф.* Зональная химическая неоднородность слитков. М. : Металлургия, 1976. 239 с.
2. Водородная технология титановых сплавов / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, В.К. Носов, А.М. Мамонов. М. : МИСиС, 2002.
3. *Глазунов С.Г., Моисеев В.Н.* Конструкционные титановые сплавы. М. : Металлургия, 1974. 338 с.
4. *Гуляев Б.Б.* Теория литейных процессов. Л. : Машиностроение, 1976. 214 с.
5. *Ильин А.А.* Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. М. : Наука, 1994. 304 с.
6. *Колачев Б.А.* Водородная хрупкость металлов. М. : Металлургия, 1989. 217 с.
7. *Колачев Б.А.* Физическое металловедение титана. М. : Металлургия, 1976. 184 с.
8. *Колачев Б.А., Ливанов В.А., Елагин В.И.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. М. : Металлургия, 1981. 414 с.
9. *Колотило Д.М., Челябинов Л.М.* Углеродные литейные формы. Киев, 1971. 167 с.
10. *Корнилов И.И.* Титан. М. : Наука, 1975. 305 с.
11. *Ливанов В.А., Буханова А.А., Колачев Б.А.* Водород в титане. М. : Металлургия, 1962. 246 с.
12. Литье по выплавляемым моделям ; под ред. В.А. Озерова. М. : Машиностроение, 1994. 448 с.
13. *Магницкий О.Н.* Литейные свойства титановых сплавов. Л. : Машиностроение, 1968. 119 с.
14. *Неуструев А.А., Ходоровский Г.Л.* Вакуумные гарнисажные печи. М. : Металлургия, 1967. 272 с.
15. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А.В. Курдюмов, М.В. Пикунов, В.М. Чурсин, Е.Л. Бибииков. М. : МИСиС, 1996. 504 с.
16. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / А.Г. Братухин, Е.Л. Бибииков, С.Г. Глазунов [и др.]. М. : ВИЛС, 1998. 292 с.

17. *Пульцин Н.М.* Взаимодействие титана с газами. М. : Metallurgy, 1969. 216 с.
18. Технологические и радиоизотопные исследования графитовых форм для титанового литья / А.В. Ботте, Л.М. Челядинов [и др.]. Киев, 1975. 110 с.
19. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов / А.Л. Андреев, Н.Ф. Аношкин [и др.]. М. : Metallurgy, 1994. 368 с.
20. *Филин Ю.А., Исаев А.С.* Литейное производство новых судостроительных сплавов. Л. : Судостроение, 1971. 216 с.
21. *Цвиккер У.* Титан и его сплавы. М. : Metallurgy, 1979. 512 с.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ. СВОЙСТВА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ	5
РАЗДЕЛ 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТИТАНЕ И ЕГО СПЛАВАХ	13
ГЛАВА 1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ТИТАНА С ГАЗАМИ АТМОСФЕРЫ	13
1.1. Взаимодействие титана с водородом	13
1.2. Взаимодействие титана с кислородом	19
1.3. Взаимодействие титана с азотом	23
1.4. Взаимодействие титана с парами воды	25
1.5. Взаимодействие титана с элементами Периодической системы	26
1.6. Классификация диаграмм состояния двойных систем на основе титана	28
1.7. Структурная классификация титановых сплавов	30
Контрольные вопросы	33
ГЛАВА 2. СОСТАВ И СВОЙСТВА ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	35
2.1. Состав и свойства титановых сплавов	35
2.2. Перспективные титановые сплавы	43
Контрольные вопросы	46
РАЗДЕЛ 2. ПРОИЗВОДСТВО СЛИТКОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	47
ГЛАВА 3. ПЕЧИ ДЛЯ ПЛАВКИ И ЛИТЬЯ СЛИТКОВ	47
3.1. Особенности технологического процесса плавки при литье слитков	47
3.2. Конструкция вакуумных электродуговых печей	50
Контрольные вопросы	59
ГЛАВА 4. ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛИТКОВ В ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ	61
4.1. Шихта и ее подготовка к плавке	61
4.2. Изготовление и плавка расходного электрода	66
4.3. Получение слитка второго перепада	68
Контрольные вопросы	69
ГЛАВА 5. ХИМИЧЕСКАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ СЛИТКОВ	70
5.1. Виды химической неоднородности	70
5.2. Периодическая неоднородность	72
5.3. Неоднородность слитков, вызываемая испарением легирующих компонентов	76
5.4. Неоднородность слитков, вызываемая зональной ликвацией	81
5.5. Производство слитков с использованием гарнисажной плавки	88
Контрольные вопросы	95

РАЗДЕЛ 3. ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ . . .	96
ГЛАВА 6. ЛИТЕЙНЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ	96
6.1. Основные особенности производства отливок из титановых сплавов	96
6.2. Состав, структура и механические свойства титановых сплавов	100
6.3. Литейные свойства титановых сплавов	102
6.4. Заполняемость литейных форм и факторы, влияющие на нее	104
6.5. Усадочные процессы	112
Контрольные вопросы	115
ГЛАВА 7. ПЛАВИЛЬНО-ЗАЛИВОЧНЫЕ УСТАНОВКИ	116
7.1. Сущность гарнисажной плавки титановых сплавов	116
7.2. Конструкции электродуговых плавно-заливочных установок	121
7.3. Гарнисажная плавка независимыми источниками теплоты	130
7.4. Шихтовые материалы для плавки титановых сплавов	131
7.5. Технологический процесс плавки	133
Контрольные вопросы	137
ГЛАВА 8. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ	139
8.1. Исходные формовочные материалы	139
8.2. Изготовление литейных форм по выплавляемым моделям	149
8.3. Изготовление уплотняемых и прессованных форм	155
8.4. Изготовление разъемных оболочковых литейных форм	164
Контрольные вопросы	171
ГЛАВА 9. ФОРМИРОВАНИЕ ОТЛИВКИ	172
9.1. Этапы формирования отливки	172
9.2. Заполнение форм расплавом при стационарной заливке	176
9.3. Заполнение форм при центробежном литье отливок	181
9.4. Литниковые системы для центробежного литья	184
Контрольные вопросы	191
ГЛАВА 10. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ ХИМИЧЕСКОЙ ИНЕРТНОСТИ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ	193
10.1. Физико-химическое взаимодействие отливки с формой	193
10.2. Повышение химической инертности графитокочковых форм	203
10.3. Повышение химической инертности керамических форм	218
Контрольные вопросы	223
ГЛАВА 11. ВОДОРОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ	225
11.1. Основы водородной технологии производства титановых отливок	225
11.2. Формирование отливок в атмосфере водорода	228
11.3. Безотходное отделение литников и прибылей от отливок	237
11.4. Переработка и подготовка к использованию литейных отходов	244

11.5. Применение водородного пластифицирования титановых сплавов при горячем изостатическом прессовании	250
Контрольные вопросы	255
ГЛАВА 12. ДЕФЕКТЫ В ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ	256
12.1. Классификация дефектов	256
12.2. Газонасыщенный поверхностный слой	259
12.3. Пригар на поверхности отливок	267
12.4. Шероховатость поверхности отливок	273
12.5. Пористость и газовые раковины	276
12.6. Дефекты, вызванные нарушением режима заполнения форм расплавом	283
12.7. Методы контроля дефектов в отливках	287
12.8. Исправление дефектов титановых отливок	290
Контрольные вопросы	294
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	295

Учебное издание

Бибиков Евгений Львович
Ильин Александр Анатольевич

Литье титановых сплавов

Учебное пособие

Оформление художника *С.Б. Дьякова*
Художественный редактор *А.В. Антипов*
Компьютерная верстка *А.В. Антипов*
Корректор *Ю.В. Жаркова*

Подписано в печать 24.07.2013
Формат 60×90/16. Бумага мелованная
Печ. л. 19,0. Усл. печ. л. 19,0
Уч.-изд. л. 20,17. Тираж 600 экз. Заказ № 2814.

Издательский Дом «Альфа-М»
Адрес: 127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1
Тел./факс: (495) 363-4270(доб. 573)
E-mail: alfa-m@inbox.ru

ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»
Адрес: 127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1

По вопросам приобретения книг обращайтесь:

- Отдел продаж «ИНФРА-М», 127282, Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1;
тел. (495) 363-4260; факс (495) 363-9212; e-mail books@infra.ru
- Отдел «Книга–почтой», тел. (495) 363-4260 (доб. 232, 246)

Отпечатано способом ролевой струйной печати
в ОАО «Первая Образцовая типография»
Филиал «Чеховский Печатный Двор»
142300, Московская область, г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1
Сайт: www.chpd.ru. E-mail: sales@chpd.ru.
8(495)988-63-76. т/ф. 8(496)726-54-10



ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»



Издательский Дом «Альфа-М»

Е.Л. Бибиков, А.А. Ильин

Процессы кристаллизации и затвердевания

Учебное пособие

М. : Альфа-М : ИНФРА-М, 2013. 352 с.

ISBN 978-5-98281-341-1 («Альфа-М»)

ISBN 978-5-16-006662-2 («ИНФРА-М»)

Гриф УМО

Рассматриваются физико-химические процессы, происходящие в период затвердевания металлических расплавов при изготовлении отливок и слитков, и их влияние на формирование структуры литого металла и образование в нем дефектов. Излагаются теоретические основы формирования кристаллического строения литого металла, методы модифицирования сплавов, особенности их кристаллизации в зависимости от состава и условий охлаждения. Приводятся сведения об основных технологических направлениях, исключающих образование дефектов.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 150100 «Материаловедение и технологии материалов».

- По вопросам **оптового заказа** следует обращаться в отдел продаж «ИНФРА-М»: 127282, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1
тел.: (495) 363-4260 (многоканальный)
факс: (495) 363-9212
e-mail: books@infra-m.ru
<http://www.infra-m.ru>



ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»



Издательский Дом «Альфа - М»

**А.А. Ильин, В.В. Плихунов, Л.М. Петров,
В.С. Спектор**

Вакуумная ионно-плазменная обработка

Учебное пособие

М. : Альфа-М : ИНФРА-М, 2014. – 160 с. : ил.

ISBN 978-5-98281-366-4 («Альфа-М»)

ISBN 978-5-16-009188-4 («ИНФРА-М»)

Гриф УМО

Рассматриваются актуальные вопросы формирования потоков газовой и металлической плазмы, равномерность их распределения в рабочем объеме камер вакуумных установок, а также изменения конденсата металлической плазмы при формировании структур и свойств модифицированных поверхностных слоев, однослойных, многослойных, градиентных наноструктурных покрытий при вакуумной ионно-плазменной обработке. Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки магистров 150100 «Материаловедение и технологии материалов».

- По вопросам **оптового заказа** следует обращаться в отдел продаж «ИНФРА-М»: 127282, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1
тел.: (495) 363-4260 (многоканальный)
факс: (495) 363-9212
e-mail: books@infra-m.ru
<http://www.infra-m.ru>



ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М»



Издательский Дом «Альфа - М»

А.А. Ильин, Г.Б. Строганов, С.В. Скворцова

Покрyтия различного назначения для металлических материалов

Учебное пособие

М. : Альфа-М : ИНФРА-М, 2013. – 144 с.

ISBN 978-5-98281-355-8 («Альфа-М»)

ISBN 978-5-16-006944-9 («ИНФРА-М»)

Гриф УМО

Приводятся теоретические и технологические аспекты нанесения защитных упрочняющих и функциональных покрытий, в том числе образованных наноструктурными материалами. Рассматриваются покрытия, наносимые в вакууме, в открытой атмосфере с использованием плазмы, электронного и лазерного лучей, химико-термической обработки и других эффективных методов.

Для студентов и аспирантов технических университетов.

Представляет интерес для преподавателей и инженерно-технических работников, специализирующихся в области разработки и применения новых эффективных технологических процессов и материалов.

- По вопросам **оптового заказа** следует обращаться в отдел продаж «ИНФРА-М»:
127282, г. Москва, ул. Полярная, д. 31В, стр. 1
тел.: (495) 363-4260 (многоканальный)
факс: (495) 363-9212
e-mail: books@infra-m.ru
<http://www.infra-m.ru>