

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Металлургия и технологии обработки материалов»**

# **ПРОГРЕССИВНЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**ПОСОБИЕ**

**для магистрантов специальности 1-42 80 01  
«Инновационные технологии в металлургии»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2023**

УДК 621:74(075.8)  
ББК 34.722.51я73  
П78

*Рекомендовано научно-методическим советом  
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 8 от 01.03.2022 г.)*

Составитель *О. В. Герасимова*

Рецензент: декан машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук, доц. *Г. В. Петришин*

**Прогрессивные** литейные технологии : пособие для магистрантов специальности  
П78 1-42 80 01 «Инновационные технологии в металлургии» днев. и заоч. форм обучения /  
сост. О. В. Герасимова. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2023. – 75 с. – Систем. требова-  
ния: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц; 32 Mb RAM; свободное место на HDD 16 Mb; Windows 98 и выше; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Приведен теоретический материал для курса «Прогрессивные литейные технологии».  
Для магистрантов специальности 1-42 80 01 «Инновационные технологии в металлургии»  
дневной и заочной форм обучения.

УДК 621:74(075.8)  
ББК 34.722.51я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2023

## Тема 1. Современные технологии при плавке и заливке литейных сплавов

### Классификация литейных сплавов

**Классификация чугунов и сталей.** Сталью называют железоуглеродистые сплавы, содержащие менее 2,14 % С. К чугунам относятся железоуглеродистые сплавы, содержащие более 2,14 % С. В структуре двойных сплавов Fe–С в зависимости от состава и температуры могут быть следующие фазы: жидкий раствор – единая фаза, существующая при температурах выше линии ликвидуса; аустенит – высокотемпературная пластичная фаза, являющаяся твердым раствором внедрения углерода в  $\gamma$ -железе; предельная растворимость углерода составляет 2,14% при эвтектической температуре (1147 или 1153°C); цементит – химическое соединение – карбид железа  $Fe_3C$ , содержит 6,67% С. В серые чугуны для повышения жидкотекучести вводят фосфор в количествах больших 0,3 %. В этом случае в чугунах образуется фосфидная эвтектика  $Fe(P) + Fe_3C + Fe_3P$  с температурой плавления на 150...200 °С ниже температуры затвердевания основной массы чугуна. Фосфидная эвтектика (с т э д и т) в чугунах расположена по границам зерен. При содержании фосфора в чугуне выше 0,6 % включения фосфидной эвтектики образуют почти непрерывную сетку, чугун становится хрупким и обладает только упругими свойствами, что используется при изготовлении индивидуально отливаемых поршневых колец. Содержание кремния в серых чугунах значительно больше, чем в углеродистых сталях, поэтому он влияет на положение критических точек: несколько снижается эвтектическая температура и уменьшается эвтектическая концентрация углерода, а температура эвтектического превращения повышается. В настоящее время считается необходимым использовать тройную диаграмму состояния Fe–C–Si. Однако следует заметить, что названные смещения критических точек и химического состава на диаграмме Fe–C в настоящее время успешно учитываются удобными для практического пользования специальными характеристиками: степенью эвтектичности  $S_{эвт}$  и аналогичным по смыслу углеродным эквивалентом  $C_{экв}$ . Степень эвтектичности определяется из выражения  $S_{эвт} = C \cdot 4,26 - 0,31Si - 0,33P - 0,4S + 0,03Mn$ . Для вычисления углеродного эквивалента (%) можно использовать следующие три уравнения:  $C_{экв} = C + 0,33Si + 0,33P + 0,4S - 0,03Mn$ ,

$C_{\text{ЭКВ}} = C + Si + P3$ ,  $C_{\text{ЭКВ}} = C + Si 3$ . В приведенных уравнениях для  $S_{\text{ЭВТ}}$  и  $S_{\text{ЭКВ}}$  под символом каждого химического элемента понимается его содержание, в чугуна (%). Эти уравнения позволяют найти положение конкретного многокомпонентного чугуна с содержанием углерода  $C_{\text{ЭКВ}}$  на двойной диаграмме Fe–C и определить, например, температуры-ликвидуса и солидуса для чугуна данного состава. На практике чаще решают обратную задачу. Снимают кривую охлаждения, определяют  $T_{\text{л}}$ , а по ней находят химический состав чугуна, во всяком случае его углеродный эквивалент. Ранее, а в некоторых случаях и сейчас, пользуются простой суммой содержания углерода и кремния. Одной из самых ярких отличительных особенностей чугунов, свойственной только им, является зависимость их структуры не только от химического состава чугуна, но и от скорости охлаждения (затвердевания и последующего остывания) или в практическом смысле от толщины стенки отливки. Кроме того, структура чугунов зависит также от модифицирования. Применяя модифицирование, можно чугун, который после затвердевания должен быть белым, получить серым. В соответствии с двойной диаграммой Fe–C возможно получение только двух видов чугуна: белого со структурой перлит + ледебурит + цементит (П + Л + Ц) и серого ферритного со структурой феррит + графит (Ф + Г). Практически же при одном и том же химическом составе кроме названных двух видов с их структурой получают еще по крайней мере три вида чугуна: половинчатый со структурой перлит + цементит + графит (П + Ц + Г), перлитный (П + Г) и перлитно-ферритный (П + Ф + Г). При этом кроме модифицирования управляющим фактором является скорость охлаждения или толщина стенки отливки. Рассмотрим подробнее названные пять типов (видов) чугунов. Белый чугун состоит в основном из перлита и цементита. Структура заэвтектического белого чугуна – П + Л, эвтектического – Л + Ц, доэвтектического – Л (ледебурит). Сам ледебурит является эвтектической смесью перлита и цементита. Поэтому общую структурную форму белого чугуна можно представить в виде П + Ц, подразумевая под цементитом структурно свободный первичный, вторичный и ледебуритный цементит. В белом чугуне весь углерод находится в виде химического соединения с железом, за исключением углерода растворенного в феррите (0,025 % С). Белый чугун редко применяют в машиностроении, лишь в тех случаях, когда деталь работает на износ (распределительные валы, щеки камнедробилок,

катки для мостовых, прокатные валки, вагонные колеса и т.п.). При этом деталь отливают таким образом, чтобы только у рабочей поверхности получился белый чугун, а в центре сечения должен быть серый чугун. Такие отливки называют «отбеленными». Связано это с тем, что сквозной отбел можно получить только в отливках с толщиной стенки менее 50 мм. Белый чугун применяют также в производстве ковкого чугуна. При этом сначала детали отливают из белого чугуна, а затем подвергают длительному графитизирующему отжигу. В настоящее время отливки из ковкого чугуна применяют все реже из-за их дороговизны и заменяют ковкий чугун высокопрочным чугуном с шаровидным графитом. Половинчатый перлито-цементитный чугун состоит из перлита, включений структурно свободного цементита и пластинчатого графита. При модифицировании чугуна магниевыми лигатурами структура может получиться перлито-цементитной с шаровидным графитом. Отливки из половинчатого чугуна плохо обрабатываются, для машиностроительных отливок он практически не применяется. Обычно встречается как брак при производстве отливок из серого чугуна, в некоторых случаях исправляемый графитизирующим отжигом. При изготовлении отливок из чугуна с шаровидным графитом отжиг является обязательной технологической операцией. Серый чугун в литом состоянии обязательно имеет в своей структуре свободный графит различной формы, чаще всего пластинчатый. По структуре основной металлической матрицы отливки из серого чугуна могут принадлежать к одному из следующих трех типов. Перлитный серый чугун состоит из перлита и, например, пластинчатого или шаровидного графита. Из всех серых чугунов с пластинчатым графитом перлитный чугун обладает наибольшей прочностью, умеренной твердостью и хорошей обрабатываемостью. Перлито-ферритный чугун состоит из перлита, феррита и графита. Пластинки графита в таком чугуне получаются более крупными, чем в перлитном чугуне. Перлито-ферритный чугун обладает меньшими прочностью и твердостью и лучшей обрабатываемостью по сравнению с перлитным чугуном. Феррит обычно располагается вокруг графитовых включений в виде оторочки. Структура П + Ф + Г чаще всего встречается в машиностроительном литье. Ферритный серый чугун состоит из феррита и графита, включения которого крупнее, чем в перлитном и перлито-ферритном чугунах. Он имеет меньшую прочность и твердость, быстро изнашивается, очень легко

обрабатывается. Часто в ферритных чугунах графит получают шаровидной формы. По условиям эксплуатации чугуны должны обладать не только, определенной прочностью, но и рядом специальных свойств: жаростойкостью, жаропрочностью, износостойкостью, коррозионной стойкостью и др. Эти свойства обеспечиваются легированием одним или несколькими элементами. По составу чугунам присваиваются названия именно по легирующему элементу: хромистые, никелевые, кремниевые, алюминиевые, марганцевые, ванадиевые. Буквы в марках легированных чугунов обозначают: Ч – чугун; Х – хром; Н – никель; Т – титан; С – кремний; Г – марганец; М – молибден; Д – медь; Ю – алюминий; П – фосфор; Ш – шаровидный; И износостойкий; Ж – жаростойкий. Хромистые чугуны предназначены для изготовления жаростойких, коррозионно-стойких и износостойких отливок. Содержание хрома в жаростойких чугунах колеблется от 1,0 до 32 % (чугуны ЖЧХ1..ЖЧХ30). Предельная рабочая температура для хромистых чугунов с содержанием 13–16 % Cr составляет 900 °С, для чугунов с 20–30 % Cr – 1200 °С. Хромистые чугуны ЧХ34 обладают высокой коррозионной стойкостью в растворах различных солей и кислот. Износостойкость хромистых чугунов повышается дополнительным легированием никелем, титаном, молибденом (ИЧХ2Н4, ИЧХ3ТД, ИЧХ15М2). Хромистые чугуны имеют большую линейную (2,0–2,5 %) и объемную (до 7 %) усадку, склонны к горячим и холодным трещинам. Никелевые чугуны с 0,5–1,5 % Ni имеют перлитно-цементитную матрицу, относятся к конструкционным материалам и используются для изготовления деталей, работающих в условиях изнашивания в агрессивной газовой среде: поршневые кольца (ЧНХТ, ЧН1ХД), цилиндры тепловозных и судовых двигателей, зубчатые колеса (ЧН2Х).

Классификация стали. Отливки из стали классифицируют по пяти основным признакам: по химическому составу, структуре, назначению, способу выплавки стали, требованиям к детали. По химическому составу отливки делятся на 4 группы: – из углеродистой нелегированной стали; их состав различается только содержанием углерода при одинаковом содержании других элементов – кремния, марганца, серы, фосфора; вследствие этого их можно разделить на отливки из низкоуглеродистой ( $C < 0,2\%$ ), среднеуглеродистой ( $C = 0,2–0,4\%$ ) и высокоуглеродистой ( $C > 0,4\%$ ) стали; из низколегированной стали; суммарное содержание легирующих

элементов не превышает 3,5 %; из среднелегированной стали; суммарное содержание легирующих элементов находится в пределах 3,5–10,0 %; из высоколегированной стали с содержанием легирующих элементов более 10,0 %. По структуре углеродистые и легированные стали классифицируются отдельно. Это объясняется тем, что сходные структурные составляющие, например феррит, аустенит, могут обладать различными свойствами в зависимости от содержания тех или иных легирующих элементов. Отливки из углеродистых сталей обычно имеют ферритную, ферритноперлитную и перлитную структуру и относятся соответственно к ферритному или перлитному классам. Но даже и в таких сталях чистой ферритной или перлитной структуры не образуется. Отливки из легированных сталей в зависимости от концентрации легирующих элементов, углерода и режима термической обработки делятся на 6 классов, отливки из: мартенситных сталей; мартенситно-ферритных сталей; ферритных сталей; аустенитно-мартенситных сталей; аустенитно-ферритных сталей; аустенитных сталей. По назначению или служебным свойствам стальные отливки можно разделить на 4 большие группы, отливки из: Л – литейная сталь, например Ст15Л, 35Л, 50Л. Это означает, что в сталях содержится около 0,15 %, 0,35 % и 0,50 % углерода соответственно. В легированных литейных сталях основные легирующие элементы обозначают буквами: Д – медь; К – кобальт; М – молибден; Н – никель; П – фосфор; Р – бор; С – кремний; Т – титан; Ф – ванадий; Х – хром; Ц – цирконий; Ю – алюминий; А – азот; Б – ниобий; В – вольфрам; Г – марганец. Цифры после букв показывают среднее содержание легирующего элемента в данной марке стали. Если содержание элемента менее 1,5 %, цифру за буквенным индексом не приводят. Содержание углерода указывается в сотых долях процента в начале марки. Например: Ст08Х14НДЛ содержит в среднем 0,08 % углерода, 14 % хрома, около 1,2% никеля и около 1 % меди; Ст110Г13Л содержит в среднем 1,1 % С и 13 % Мп. Обозначение стальной отливки в технических требованиях чертежа выглядит следующим образом: – отливка 1-й группы Ст15Л ГОСТ 977–88; – отливка 3-й группы Ст110Г13Л ГОСТ 977–88. Если сталь предназначена для отливок, эксплуатируемых при низких температурах (до –60 °С), например, в условиях Крайнего Севера или Сибири, то в этом случае обозначение материала стальной отливки выглядит следующим образом: – сталь 35ГМЛ ГОСТ 21357–87; – сталь 45Л ГОСТ 21357–87. Состав и свойства литейных алюминиевых

сплавов. Алюминий обладает кубической гранцентрированной кристаллической решеткой и не испытывает аллотропических превращений. Он имеет небольшую плотность ( $2,7 \text{ г/см}^3$ ), невысокую температуру плавления ( $660 \text{ }^\circ\text{C}$ ). ГОСТ 11069–74 предусматривает выпуск первичного алюминия 13 марок (А99-99,99 %, А5-99,5) Основными примесями алюминия являются железо и кремний. С железом алюминий взаимодействует с образованием нескольких химических соединений. При одновременном присутствии железа и кремния, кроме фаз, характерных для двойных систем, в структуре могут появляться и сложные тройные соединения ( $\text{FeAlSi}$ ) и ( $\text{FeAlSi}$ ). Примеси железа и кремния оказывают вредное влияние на алюминий. Для изготовления отливок в промышленности используют пять групп литейных алюминиевых сплавов: I – сплавы на основе системы Al – Si; II – сплавы на основе системы Al – Cu – Si; III – сплавы на основе системы Al – Si; IV – сплавы на основе системы Al – Mg; V – сложнолегированные сплавы. Химический состав литейных сплавов регламентирует ГОСТ 1583–93. Наибольшее применение в промышленности находят сплавы I и II групп. Сплавы I группы (силумины) широко используют в авиационной, автомобильной, приборостроительной, машиностроительной, судостроительной и электротехнической промышленности. По содержанию кремния (6–13 %) все они, за исключением сплава АК12, являются доэвтектическими в системе Al – Si и имеют узкий интервал кристаллизации и хорошие литейные свойства – небольшую линейную усадку, повышенную жидкотекучесть, малую склонность к образованию трещин при затрудненной усадке и рассеянной усадочной пористости. Сплав АК12 по содержанию кремния близок к эвтектике. Основными структурными составляющими двойных сплавов алюминия с кремнием являются первичные кристаллы  $\alpha$  Al твердого раствора и двойная эвтектика  $\alpha$  Al + Si. Наиболее вредной из регламентированных примесей в доэвтектических силуминах является железо, образующее с компонентами сплава тройную промежуточную фазу P ( $\text{AlFeSi}$ ), кристаллизующуюся в форме грубых иглообразных выделений, резко снижающих пластические свойства сплавов. По мере измельчения структуры сплавов вредное влияние железа уменьшается. Поэтому допустимое содержание железа в силуминах при литье в песчаные формы (0,6 %) ниже, чем при литье в металлические (1–1,5 %) формы. Для нейтрализации вредного влияния железа в сплавы вводят 0,3–0,4 % марганца или



бериллия, которые подавляют образование  $\beta$ -фазы и способствуют выделению более сложных фаз ( $Al - Mn - Fe - Si$ ) и ( $Al_7Fe_3Be_7$ ), кристаллизующихся в компактной форме. Примеси кальция, бария, лития и натрия способствуют развитию газоусадочной пористости. Заэвтектические сплавы (14–20 % Si) отличаются жаропрочностью, повышенной износостойкостью и небольшим коэффициентом термического расширения. Основными структурными составляющими этих сплавов являются кристаллы кремния и эвтектика  $\alpha Al + Si$ . Заэвтектические силумины также применяют в модифицированном состоянии, так как немодифицированные сплавы с грубыми выделениями первичного кремния плохо обрабатываются резанием и обладают хрупкостью. Модифицирование фосфором существенно улучшает их свойства. Сплавы II группы в качестве основных легирующих компонентов содержат кремний (4–8 %) и медь (1–8 %). Их широко применяют при изготовлении отливок с повышенной твердостью и прочностью, сохраняющих постоянство размеров в процессе эксплуатации и имеющих высокую чистоту обработанной поверхности – корпусов приборов, автомобильных и тракторных поршней, деталей авиационных двигателей воздушного охлаждения. Сплавы этой группы за счет усложнения состава и более сильного пересыщения  $\alpha Al$  твердого раствора более жаропрочны, чем силумины. Они обладают хорошей жидкотекучестью, малой линейной усадкой, но более склонны, чем сплавы I группы, к образованию усадочной пористости и трещин при затрудненной усадке. Так же, как и силумины, сплавы II группы имеют многофазную структуру. Основными структурными составляющими их являются первичные кристаллы твердого раствора  $\alpha Al$ , двойная эвтектика  $\alpha Al + Si$  и тройная эвтектика  $\alpha Al + Si + CuAl_2$ . В некоторые сплавы II группы для измельчения зерна вводят титан. Сплавы на основе системы  $Al - Cu$  (III группа) отличаются высокими механическими свойствами и низкой коррозионной стойкостью. В отличие от сплавов I группы они хорошо обрабатываются резанием. Обладая широким интервалом кристаллизации, сплавы этой системы склонны к образованию усадочных трещин и рассеянной усадочной пористости; они менее жидкотекучи, чем сплавы I группы. Основными структурными составляющими сплавов III группы являются  $\alpha Al$  твердый раствор меди в алюминии и эвтектика  $\alpha Al + CuAl_2$ . Кроме того, в структуре сплавов всегда обнаруживаются выделения железистой составляющей ( $Al - Mn - Fe - Si$ ). Для

измельчения зерна отливок и повышения механических и литейных свойств двойные сплавы легируют марганцем, титаном, цирконием или церием. Прочностные характеристики сплавов могут быть повышены термической обработкой. Примеси кальция, лития и натрия ухудшают литейные свойства сплавов этой группы. Взаимодействуя с влагой литейных форм, они способствуют увеличению газовой пористости отливок. Сплавы системы Al – Mg (IV группа) отличаются малой плотностью, высокими коррозионной стойкостью и прочностью; их используют для изготовления отливок, несущих большие вибрационные нагрузки. Эти сплавы имеют низкие литейные свойства: обладают повышенной склонностью к окислению и образованию усадочных трещин и рыхлот, взаимодействуют с влагой литейных форм, имеют низкую, жидкотекучесть. Основными структурными составляющими сплавов этой группы являются  $\alpha$  Al твердый раствор магния в алюминии и двойная эвтектика Al +  $Al_8Mg_5$ . При неравновесной кристаллизации сплавов системы Al – Mg образующая вследствие дендритной ликвации неравновесная интерметаллидная фаза  $\beta$  ( $Al_8Mg_5$ ) выделяется по границам дендритных ячеек  $\alpha$  Al твердого раствора. Для повышения механических свойств и снижения газовыделения; при кристаллизации двойные сплавы легируют цирконием (0,3 %); коррозионную стойкость повышают введением хрома или марганца". Присадки бериллия и бора предохраняют расплав от загорания. Примеси меди, железа и кремния снижают пластические свойства сплавов, образуя химические соединения, выделяющиеся по границам зерен. Сплавы IV группы подвергают упрочняющей термической обработке. Сложнолегированные сплавы V группы применяют для изготовления отливок с повышенной стабильностью размеров, работающих при повышенных температурах и давлениях, а также для изготовления сварных конструкций и отливок, хорошо обрабатываемых резанием. Сплавы V группы имеют сложную многофазную структуру, обуславливающую высокую склонность их к горячим трещинам. Основными структурными составляющими сплавов этой группы являются фазы:  $S(Al_2CuMg)$ ,  $Al_3(Ni, Cu)_2$ ,  $T(Al_6Cu_4Ni)$ . Примеси железа и кремния образуют, по-видимому, тройную промежуточную фазу  $\beta$  (Al– Fe–Si). Основную роль в упрочнении сплавов при термической обработке играет фаза  $S(Al_2CuMg)$ . Состав и свойства литейных магниевых сплавов. Магний обладает гексагональной плотноупакованной кристаллической

решеткой, имеет невысокую температуру плавления ( $651\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и небольшую плотность ( $1,738\text{ г/см}^3$  при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\sim 1,6\text{ г/см}^3$  при температуре плавления). Объемная усадка, при переходе из жидкого состояния в твердое, равна  $3,97\text{--}4,2\%$ , относительное удлинение ( $6\text{--}8\%$ ). Чистый магний характеризуется высокой химической активностью. Он легко окисляется. У образующейся оксидной пленки при температуре выше  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  отсутствуют защитные свойства. С повышением температуры скорость окисления возрастает, а при  $623\text{ }^{\circ}\text{C}$  магний воспламеняется на воздухе. Магний в значительно большем количестве, чем алюминий, поглощает водород. С водой магний интенсивно реагирует с выделением водорода, который часто является причиной взрывов из-за образования гремучего газа. ГОСТ предусматривает выпуск трех марок первичного магния, различающихся содержанием примесей (Мг-96-99,96). Наиболее вредными примесями являются никель и железо. Они сильно снижают коррозионную стойкость магния. Для изготовления фасонных отливок в промышленности используют три группы магниевых сплавов: I группа – сплавы на основе системы Mg–Al–Zn (МЛ3, МЛ4, МЛ5, МЛ6); II группа – сплавы на основе системы Mg–Zn–Zr (МЛ8, МЛ12, МЛ15); III группа – сплавы, легированные редкоземельными элементами (МЛ9, МЛ 10, МЛН, МЛ 19). Химический состав литейных промышленных сплавов регламентируется по ГОСТ 2856–79. Все сплавы I группы, за исключением сплава МЛ3, относят к числу высокопрочных. Основным упрочнителем в этих сплавах является алюминий, растворимость которого в магнии при эвтектической температуре составляет  $12,7\%$ , а при комнатной  $1,5\%$ . Цинк также упрочняет магний, но менее эффективно, чем алюминий. Сплавы I группы предназначены для производства высоко-нагруженных отливок, работающих в тяжелых атмосферных условиях (большая влажность). Для повышения коррозионной стойкости в сплавы системы Mg–Al–Zn вводят  $0,1\text{--}0,5\%$  Мп, а для снижения окисляемости  $0,001\text{--}0,002\%$  Ве или до  $0,1\%$  Са. Кальций, кроме того, повышает плотность отливок и улучшает способность сплавов к термообработке. В качестве примесей в сплавах I группы присутствуют кремний, железо, никель, медь и цирконий. Большинство из них снижают коррозионную стойкость сплавов. Цирконий оказывает модифицирующее действие на макроструктуру сплавов. Основными структурными составляющими сплавов системы Mg–Al–Zn–Mn

являются первичные кристаллы  $\alpha$ Mg-твердого раствора алюминия и цинка в магнии,  $\gamma$ -фаза (Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>),  $\eta$ -фаза (MnAl) и марганцевая фаза (Mn). Общим недостатком сплавов I группы, за исключением сплава МЛЗ, является широкий интервал кристаллизации и в связи с этим склонность к образованию усадочной микрорыхлоты. Сплав МЛЗ используют при изготовлении отливок простой конфигурации с повышенной герметичностью для работы при средних статических и динамических нагрузках. В отличие от сплавов МЛ5 и МЛ6 сплав МЛЗ обладает небольшим равновесным интервалом кристаллизации (55–60 °С), малой склонностью к образованию микропористости, большей линейной усадкой, повышенной склонностью к образованию усадочных трещин и низкой жидкотекучестью. Сплав МЛ4 используют для работы при повышенных нагрузках; он имеет высокую коррозионную стойкость. Сплав МЛ4 применяют в основном для литья в песчаные формы. Сплав МЛ5 применяют для нагруженных деталей, работающих в условиях ударного и вибрационного воздействия. В связи с удовлетворительными литейными свойствами его используют для изготовления отливок всеми способами литья. Сплав МЛ5 является основным литейным магниевым сплавом. Сплав МЛ6 из-за большого интервала кристаллизации (~160°С) и повышенного содержания цинка более склонен к микропористости, чем сплав МЛ5. Удовлетворительные литейные свойства позволяют изготавливать из него отливки всеми способами литья. Отливки подвергают термической обработке по режиму Т2. Сплавы II группы также относят к числу высокопрочных. Они отличаются от других групп магниевых сплавов повышенными механическими свойствами и хорошей обрабатываемостью резанием. Легирование их лантаном (МЛ15) улучшает литейные свойства, несколько повышает жаропрочность, плотность и свариваемость, но снижает прочность и пластичность при комнатной температуре. Увеличение содержания цинка и дополнительное легирование сплавов кадмием (МЛ8) позволяют получать более высокий уровень механических и технологических свойств, чем сплавов с лантаном. Сплавы МЛ8, МЛ 12 и МЛ 15 обладают удовлетворительными литейными свойствами, имеют измельченное цирконием зерно, способны упрочняться в процессе термической обработки. Эти сплавы позволяют получать однородные механические свойства в различных по толщине сечениях; они менее чувствительны к влиянию микрорыхлоты, так как отдельные поры располагаются в углах между

зернами, а не образуют цепочек, ослабляющих сечения отливок, но сложны в приготовлении из-за плохого растворения циркония и не свариваются на воздухе. Сплавы II группы используют для изготовления отливок, работающих при 200–250 °С и высоких нагрузках. Основными структурными составляющими сплавов МЛ8 и МЛ12 являются  $\alpha$ Mg-твердый раствор цинка и циркония в магнии и включения интерметаллидов  $Mg_2Zn_3$  и  $ZrZn_2$ , являющихся упрочнителями при термической обработке. Сплавы III группы обладают высокой жаропрочностью и хорошей коррозионной стойкостью. Они предназначены для длительной работы при 250–350 °С и кратковременной – при 400 °С. Эти сплавы имеют хорошие литейные свойства, высокую герметичность, малую склонность к образованию микрорыхлот и усадочных трещин, высокие и однородные механические свойства в сечениях различной толщины и хорошо свариваются аргонно-дуговой сваркой. Сплавы системы Mg–P<sub>3</sub>M–Zr применяют для деталей, подвергающихся одновременному воздействию статических и усталостных нагрузок. Основными структурными составляющими сплавов системы Mg–Nd–Zr (МЛ9 и МЛ 10) являются:  $\alpha$ Mg-твердый раствор неодима и циркония в магнии и двойная эвтектика  $\alpha$ Mg + Mg<sub>9</sub>Nd. Возможно также образование фазы  $Mg_2Zr$ . Кроме  $\alpha$ Mg-твердого раствора основной избыточной фазой в сплавах с церием является Mg<sub>3</sub>Ce (или Mg<sub>12</sub>Ce). В структуре сплава МЛ19 в качестве основной избыточной фазы присутствует интерметаллид Mg<sub>9</sub>Nd (или Mg<sub>12</sub>Nd). Кроме того, в зависимости от содержания легирующих элементов в числе структурных составляющих может присутствовать фаза (Mg, Zn)<sub>3</sub>(Nd–Y). Упрочнителями при термической обработке являются фазы Mg<sub>9</sub>Nd или Mg<sub>12</sub>Nd.

Состав и свойства медных сплавов. Температура плавления меди 1083 °С, плотность 8,96 г/см<sup>3</sup>; она имеет гранцентрированную кубическую решетку с периодом  $a = 0,36074$  нм. Высокую теплопроводность меди [3,86 Вт/(м·К)] используют при изготовлении кристаллизаторов при непрерывном и полунепрерывном литье металлов, водоохлаждаемых изложниц и «холодных» тиглей при плавке тугоплавких металлов и сплавов (печи электрошлакового переплава, электронно-лучевые и плазменные плавильные установки и др.). Медь обладает высокими коррозионными свойствами. Она устойчива на воздухе, в пресной и морской воде и ряде других химических агрессивных сред. Медь сохраняет высокие свойства при

пониженных температурах, поэтому ее применяют в криогенной технике. Выпускается одиннадцать марок меди (ГОСТ 859–78) (М00б99,99,,,М0-99,5). Для изготовления фасонных отливок используют три группы медных сплавов: оловянные бронзы, безоловянные бронзы и латуни. Оловянные бронзы обладают хорошими литейными свойствами в сочетании с хорошими механическими и эксплуатационными (коррозионными, антифрикционными) свойствами. Наибольшее практическое значение имеют сплавы с содержанием олова до 10%. В промышленных сплавах встречаются следующие фазы:  $\alpha$ -твердый раствор олова в меди с гранцентрированной кубической решеткой,  $\beta$ - и  $\gamma$ -фазы, образующиеся в результате перитектических реакций и обладающие объемноцентрированной кубической решеткой. Форма, размеры и расположение ( $\alpha + \delta$ ) эвтектоида в оловянных бронзах во многом определяют свойства литых оловянных бронз. Количество и форма выделений эвтектоида зависят не только от содержания олова, но и от условий затвердевания расплава: чем быстрее затвердевание, тем больше количество ( $\alpha + \delta$ )-эвтектоида. С увеличением количества эвтектоида прочность бронзы возрастает до определенного предела, а пластичность падает. Оловянные бронзы находят широкое применение при изготовлении арматуры, подшипников, шестерен, втулок, работающих в условиях истирания, повышенного давления воды и водяного пара. Характерная особенность оловянных бронз – большой интервал кристаллизации (150–200 °С), что обуславливает образование в отливках рассеянной усадочной пористости. В целом оловянные бронзы имеют сравнительно хорошие литейные свойства, позволяющие получать сложные по конфигурации отливки. Бронзы с высоким содержанием олова (БрО17; БрО10Ц2; БрО10Ф1), ввиду его высокой стоимости и дефицитности применяют лишь в тех случаях, когда другие медные сплавы не обеспечивают необходимой коррозионной стойкости или повышенных антифрикционных характеристик. Вредное влияние на свойства оказывают алюминий и кремний. Сотые доли процента указанных элементов снижают механические свойства и герметичность отливок. Безоловянные бронзы по механическим, коррозионным и антифрикционным свойствам не уступают оловянным, а некоторые превосходят их. Наиболее широко применяют алюминиевые бронзы. Они имеют хорошую коррозионную стойкость в пресной и морской воде, хорошо противостоят разрушению в условиях кавитации, обладают меньшим,

чем оловянные бронзы, антифрикционным износом. Алюминиевые бронзы применяют для изготовления гребных винтов крупных судов, тяжело нагруженных шестерен и зубчатых колес, корпусов насосов и других отливок. Система Cu–Al характеризуется значительной областью  $\alpha$ -твердого раствора алюминия в меди. Промышленное использование находят бронзы с содержанием алюминия от 5 до 10–12 %, имеющие либо однофазное ( $\alpha$ фаза), либо двухфазное ( $\alpha + \gamma_2$ ) строение. Однофазные бронзы имеют высокие пластические свойства, хорошо обрабатываются давлением в горячем и холодном состояниях. Двухфазные сплавы отличаются повышенной прочностью и пониженной пластичностью. В литом (неравновесном) состоянии и при наличии других легирующих компонентов область  $\alpha$ -твердого раствора на диаграмме состояния сдвигается влево и литые бронзы, содержащие примерно более 7 % алюминия, имеют двухфазное ( $\alpha + \gamma_2$ ) строение. Латунни. Для фасонного литья применяют сложнолегированные медноцинковые сплавы; простые латуни используют сравнительно редко. Практическое значение имеют латуни, содержащие до 45–50 % Zn со структурой  $\alpha$ ;  $\alpha + \beta$  и  $\beta$ . Богатая медью  $\alpha$ -фаза (до 38–39 % Zn) является типичным твердым неупорядоченным раствором замещения цинка в меди. Хорошая растворимость цинка в меди объясняется близкими значениями атомных радиусов этих компонентов: 0,128 и 0,139 нм (цинк). Легирование двойных латуней алюминием и кремнием повышает жидкотекучесть, уменьшает угар цинка при плавке, повышает коррозионную стойкость сплавов и механические свойства. Наибольшее распространение для фасонных отливок находят кремнистая латунь ЛЦ16К4 (арматура) и свинцовая латунь ЛЦ40С (сепараторы подшипников). Железо и марганец повышают механические свойства сплавов, но снижают жидкотекучесть. Олово до 2–2,5 % повышает коррозионные, литейные и механические свойства. Свойства латуней зависят от содержания меди. Для латуней, содержащих медь на верхнем пределе допуска, характерны повышенные пластические свойства, а на нижнем пределе – высокие прочностные свойства. Легирующие элементы – алюминий, марганец, железо и др. (за исключением никеля) – действуют на структуру латуни качественно так же, как и цинк, но с гораздо большим эффектом. Варьируя концентрациями меди и легирующих компонентов в латунях даже в пределах ГОСТа, можно заметно изменять структуру, а, следовательно, и свойства литых заготовок.

Общая характеристика никеля и его сплавов. Никель относится к достаточно тяжелым цветным металлам (его плотность  $8900 \text{ кг/м}^3$ ) с высокой температурой плавления ( $1453 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Он имеет кубическую гранецентрированную решетку без полиморфных превращений. Чистый никель не отличается особо высокой жаропрочностью (при температуре  $800^\circ\text{C}$  его сточасовая длительная прочность составляет  $40 \text{ МПа}$ ), имеет средние механические свойства  $\sigma_{\text{в}} = 450 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{т}} = 220 \text{ МПа}$ ,  $\delta = 35\text{...}45 \%$ , (в литом состоянии  $\delta = 10\text{--}30 \%$ ),  $\text{НВ} = 120$ ,  $E = 205 \text{ ГПа}$ . Его ферромагнитные свойства менее сильные, чем у железа. Точка Кюри соответствует температуре  $358 \text{ }^\circ\text{C}$ . Никель отличается высокой коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, в пресной и морской воде, во многих пищевых и других органических средах. И хотя никель не наделен высоким модулем упругости и малой скоростью диффузии (двумя основными факторами, определяющими стойкость металла или сплава против разрушения и ползучести), большинство исследователей остановили свой выбор для основы жаропрочных сплавов именно на нем. Главные причины этого заключаются в следующем: высокая устойчивость структуры никеля при легировании ввиду практически целиком заполненной  $3d$ -электронной оболочки; возможность реализации всех четырех механизмов упрочнения сплавов: образование твердых растворов со многими элементами и упрочняющих интерметаллидных фаз, когерентных твердому раствору; образование при наличии добавок хрома защитных пленок, богатых  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  с низким содержанием катионных вакансий, ограничивающих скорость диффузии металлических элементов изнутри, а кислорода, азота, серы и других примесей из атмосферы внутрь сплава; повышенная склонность, при наличии добавок алюминия, к образованию, при высоких температурах, богатых  $\text{Al}_2\text{O}_3$  пленок с высокой стойкостью против окисления. Современные жаропрочные сплавы на никелевой основе содержат от 4 до 15 различных легирующих элементов в тщательно контролируемых количествах и до 10 примесных элементов, содержание которых строго контролируется при ведении плавки. Большинство никелевых сплавов содержат хром, алюминий, титан, кобальт, вольфрам, молибден, ниобий, углерод, небольшие количества бора, циркония, гафния, кремния, серы, фосфора, кальция и других элементов. По механизму влияния легирующих элементов на процесс структурообразования и свойства сплавов их можно объединить в



отдельные классы или группы. Первый класс: это элементы, входящие в состав твердого раствора, и образующие матрицу с Г.Ц.К. решеткой. К ним относятся элементы V, VI, VII групп периодической системы Менделеева, а также хром, кобальт, молибден, вольфрам, ванадий. Второй класс: это элементы, образующие упрочняющие интерметаллидные  $\gamma'$ -фазы (титан, алюминий, ниобий и др.). Третий класс: это такие элементы, как бор, цирконий, лантан, и др., и которые характеризуются большим различием с никелем в атомных диаметрах и поэтому сегрегирующих по границам зерен. Помимо трех основных классов можно выделить еще два подкласса: первый включает в себя карбидообразующие элементы (хром, молибден, вольфрам, титан, ванадий, ниобий), ко второму относятся элементы, образующие плотные диффузионные окислы (хром, алюминий), защищающие сплавы от воздействия окружающей среды. Современные литейные никелевые сплавы являются высоколегированными сплавами, упрочнение в которых достигается за счет одновременного действия сразу нескольких механизмов, что позволяет получить наибольший эффект. Естественно, что в этих условиях, и фазовый состав сплава является достаточно сложным. Матрицасплава. Основу сплава составляет высоколегированный W, Mo, Co, Nb, V и другими элементами  $\gamma$ -твердый Ni-Cr раствор. Он имеет плотноупакованную ГЦК решетку. Количество легирующих элементов, их состав и содержание изменяется для различных сплавов, в зависимости от их назначения, в очень широких пределах. На микрошлифе твердый раствор имеет светло-серебристый цвет. Упрочняющие фазы. Основные упрочняющие фазы в никелевых сплавах  $Ni_3Al$ ,  $Ni_3Ti$ ,  $Ni_3(Ti,Al)$ . Эти фазы представляют собой твердые растворы на основе интерметаллида  $Ni_3Al$ с ГЦК решеткой, который обычно обозначается  $\gamma'$  или  $Ni_3Ti$  - h-интерметаллид. В тройной системе образуется интерметаллид  $Ni_3(Ti,Al)$ , который, как правило, и является основной упрочняющей фазой в современных литейных жаропрочных никелевых сплавах и обозначается  $\gamma'$ . Фаза  $\gamma'$  довольно пластична так, что увеличение ее количества в сплавах не приводит к катастрофическому охрупчиванию, как при введении, например, карбидов, хотя пластичность никеля при этом несомненно снижается. Тантал и ниобий эффективно упрочняют  $\gamma'$ -фазу при комнатной температуре, а вольфрам и молибден не только при комнатной, но и при повышенных. Фаза  $\gamma'$  когерентна по отношению к матрице и преодолевается дислокациями по механизму перерезания.

Форма выделений связана с величиной несоответствия параметров решетки матрицы и частиц фазы. По данным В.Хагеля  $\gamma'$ -фаза имеет сферическую форму при несоответствии параметров решеток в 0–0,2 %, кубическую при несоответствии в 0,5–1,0 % и пластинчатую при несоответствии параметров решетки более 1,2 %. Размер выделений  $\gamma'$ -фазы и ее количество зависит от состава сплава, скорости кристаллизации и охлаждения отливки в форме или после гомогенизации и колеблется от 0,1 до 3,5 мкм. В сложнолегированных литейных сплавах упрочняющая  $\gamma'$ -фаза может выделяться уже в процессе кристаллизации и охлаждения отливки в форме, а в малолегированных сплавах – в процессе искусственного старения. Фаза  $\gamma'$  когерентна по отношению к матрице и преодолевается дислокациями по механизму перерезания. Форма выделений связана с величиной несоответствия параметров решетки матрицы и частиц фазы. По данным В.Хагеля  $\gamma'$ -фаза имеет сферическую форму при несоответствии параметров решеток в 0 - 0,2%, кубическую при несоответствии в 0,5 - 1,0% и пластинчатую при несоответствии параметров решетки более 1,2%. Размер выделений  $\gamma'$ -фазы и ее количество зависит от состава сплава, скорости кристаллизации и охлаждения отливки в форме или после гомогенизации и колеблется от 0,1 до 3,5 мкм. В сложнолегированных литейных сплавах упрочняющая  $\gamma'$ -фаза может выделяться уже в процессе кристаллизации и охлаждения отливки в форме, а в малолегированных сплавах – в процессе искусственного старения.

Шихта – это исходные материалы, загружаемые по совокупности в плавильную печь, которые должны обеспечить требуемое качество получаемого жидкого сплава. Количество компонентов шихты и химический состав этих компонентов определяется расчетом в зависимости от требуемого состава готового металла. Газовая фаза печи образуется из окружающей атмосферы печи (если печь не герметизирована или не вакуумирована), продуктов сгорания топлива и газообразных продуктов других химических реакций, протекающих в печи. В некоторых случаях в рабочее пространство печи вводят защитные, окислительные, рафинирующие газы, которые также входят в состав газовой фазы, участвующей во всех процессах плавки. Шлакам и называют продукты плавки, которые образуются в плавильной печи в результате сплавления веществ, посторонних по отношению к

металлу. К таким веществам относятся оксиды металла и песок на поверхности кусков шихты, зола топлива, частицы оплавившихся огнеупорных материалов и другие вещества, наличие которых зависит от выплавляемого сплава, типа плавильной печи, используемых шихтовых материалов и других особенностей технологии плавки. Самопроизвольное образование шлака (первичного или самородного) связано с затратами энергии на его разогрев и плавление, требует дополнительного времени и затрат труда (часто тяжелого ручного) на его удаление. Этим объясняется распространенное среди неспециалистов представление о шлаке как о побочном, вредном продукте плавки. Однако шлаки оказывают при надлежащих физико-химических свойствах важное положительное воздействие на качество получаемого металла. Они защищают металл от окисления, растворения в нем газов, способствуют удалению вредных примесей и т. д. Для придания шлаку требуемых физико-химических свойств в печь добавляют флюсы. Так, например, для удаления вредных примесей фосфора и серы, растворенных в стали, в шлак вводят известь  $\text{CaO}$ , которая, образуя с этими примесями прочные, нерастворимые в расплаве соединения, переводит данные элементы из металла в шлак. Футеровкой называется слой материала, образующий внутреннее пространство плавильной печи. Этот слой должен сохранять в течение длительного времени достаточно высокие прочностные свойства при высокой температуре, а также противостоять химическому воздействию со стороны шлака, расплавленного металла и газовой фазы печи. Материалы, из которых изготавливается футеровка, называются огнеупорными материалами, или просто огнеупорами. В связи с тем, что огнеупорные материалы должны противостоять химическому воздействию шлака, металла и атмосферы печи при высокой температуре, важнейшими классификационными признаками этих материалов являются огнеупорность (способность противостоять действию высоких температур) и химические свойства. В табл. приведены характеристики огнеупорных материалов, используемых при плавке литейных сплавов. Из данных табл. следует, что наибольшей огнеупорностью обладают углеродистые огнеупоры, однако на практике они применяются сравнительно редко, так как при температуре более  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  они легко окисляются, т. е. сгорают, не выдерживая химического воздействия со стороны атмосферы печи. Важнейшими компонентами огнеупоров, наиболее распространенных

в литейном производстве, являются оксиды кремния, магния, алюминия, кальция, хрома и железа. В зависимости от характера оксидов, преобладающих в составе огнеупорных материалов, они делятся на кислые, основные и нейтральные. Кислые огнеупоры – диоксид кремния и кварцевые – состоят главным образом из кислотного оксида  $\text{SiO}_2$ , поэтому такие огнеупоры хорошо противостоят так называемым кислым шлакам, основу которых составляют кислотные оксиды. В то же время шлаки, в которых преобладают основные оксиды, например  $\text{CaO}$ , будут интенсивно разрушать кислую футеровку, так как кислотный оксид  $\text{SiO}_2$  вступает в химическое взаимодействие с основными оксидами подобно тому, как кислоты реагируют с основаниями, образуя легкоплавкие соединения, например  $\text{CaSiO}_3$ . Основные огнеупоры – магнезитовые и доломитовые – содержат в большом количестве основные оксиды  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$ . Эти огнеупоры предназначены для футеровки печей, в которых по условиям технологии используются основные шлаки. Полукислые огнеупоры состоят главным образом из кислотного оксида, но содержат также амфотерный оксид  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Первичные металлические материалы Чугуны литейные (ГОСТ 4832–80) подразделяют на шесть марок по содержанию кремния. Наибольшее количество кремния содержится в чугуне марки Л1 (3,2–3,6 % Si включительно), наименьшее – в чугуне марки Л6 (1,2–1,6 % Si). В чугуне каждой из шести марок содержание марганца может быть разным в зависимости от группы, обозначаемой римскими цифрами от I до IV. Наибольшее количество марганца содержится в чугуне группы IV (от 0,9 до 1,5%), наименьшее – в чугуне группы I (до 0,5 %). В чугуне каждой марки и группы содержание фосфора может соответствовать одному из пяти классов, обозначаемых буквами А, Б, В, Г и Д. В группах А, Б и В ограничивается максимальное содержание фосфора – до 0,08; 0,12 и 0,3 % соответственно. В чугуне группы Г допускается свыше 0,3 до 0,7 % P включительно и в чугуне группы Д – свыше 0,7 до 1,2 % P включительно. Наконец по содержанию серы литейные чугуны делятся на четыре категории, обозначаемые арабскими цифрами 1, 2, 3 и 4. Самый чистый от серы чугун категории 1 содержит не более 0,02 % S, а в чугунах категории 4 ее содержание достигает 0,05 %. В документе о качестве чугуна, прилагаемом к каждой поставленной партии, указывается действительное содержание элементов, которое должно укладываться в допуски ГОСТ 4832–80. По ГОСТ 4832–80 предусмотрены семь

марок литейного чугуна, рафинированного магнием. Главное отличие этих чугунов состоит в пониженном содержании серы (0,005 ...0,01 %). Марка рафинированного чугуна начинается с букв «ЛР». Передельно-литейные чугуны (ГОСТ 805–80) выпускаются марок ПЛ1 и ПЛ2. Как и литейные, передельно-литейные чугуны делятся на группы по марганцу, классы по фосфору и категории по сере. Передельно-литейные чугуны содержат меньше кремния, чем литейные чугуны, поэтому они дешевле литейных чушковых чугунов, но для их получения требуются добавки в шихту большего количества кремния в виде ферросилиция. Для выплавки чугуна и стали в литейном производстве используются также передельные высококачественные чугуны марок ПВК1, ПВК2 и ПВК3, отличающиеся пониженным содержанием фосфора и серы. Для производства прокатных валков согласно ОСТ 1465–80 предусмотрены две марки специального валкового чугуна – ЧВ1 и ЧВ2. Природнолегированные чугуны получили свое название потому, что руды не которых месторождений железа содержат оксиды хрома, меди и других металлов. В процессе доменной плавки на таких рудах оксиды металлов частично восстанавливаются и легируют выплавленный чугун. Содержание легирующих элементов в природнолегированных чугунах невелико (0,3...3%), поэтому присадка их в шихту позволяет получать низколегированные конструкционные чугуны при минимальном угаре легирующих элементов. Это особенно важно при плавке в печах с окислительной атмосферой. Наибольшее распространение получили три вида природно- легированных чугунов: хромоникелевые марок ЛХН1 ...ЛХН101 (0,4–3,2 % Cr и 0,4–1,0 % Ni); титановые марок БТЛ3..1 БТЛ7 (0,3 % Ti) и титаномедистые марок БТМЛ3... БТМЛ7 (0–1,2% Ti и 2,0–3,0 % Cu). Ферросплавы. Ферросилиций (ГОСТ 1415–78). В марке указывается среднее содержание кремния в процентах (например, ФС20, ФС75). Для легирования чугунов и сталей используется ферросилиций марок ФС20...ФС45, в качестве раскислителей – ФС45...ФС75, в качестве модификаторов – ФС75...ФС90. Ферромарганец (ГОСТ 4755–80). В низко- и среднеуглеродистых ферромарганцах после букв Мн указывается содержание углерода в сплаве в процентах (например, ФМн2), а содержание марганца в них по умолчанию – 85... 75 %. В ферромарганце высокоуглеродистых марок – ФМн75... ФМн78 указывается содержание марганца в процентах (содержание углерода

в них около 7 %). В ферромарганце обычных марок содержится повышенное количество фосфора (0,3...0,55 %). Буква «А» в конце марки означает пониженное (до 0,05...0,1 %) содержание фосфора, буква «К» – пониженное содержание кремния, «С» – повышенное содержание кремния. При выплавке низкоуглеродистых сталей с пониженным содержанием фосфора используется металлический марганец (ГОСТ 6008–82), марки которого начинаются с букв «Мр». Содержание углерода в металлическом марганце 0,02–0,2 %, а фосфора – 0,005–0,07 %. Силикомарганец (ГОСТ 4756–77). В марке указывается минимальное содержание кремния в процентах – СМн10...СМн26. Содержание марганца в силикомарганце всех марок не менее 60–65 %. - Силикокальций (ГОСТ 4762–71). В марке указывается минимальное содержание кальция в процентах – СК10...СК30. Суммарное содержание кремния и кальция в силикокальции всех марок 75–95 % соответственно. Феррохром (ГОСТ 4757–79). Также, как и ферромарганец, различают низко-, средне-, и высокоуглеродистый феррохром с содержанием углерода соответственно до 0,5; 4 и 8 %. Содержание углерода указывается в марке в сотых долях процента (например, в феррохроме ФХ050 содержится 0,50 % С). В маркировке азотированного феррохрома содержание азота указывается в сотых долях процента после буквы Н (например, в феррохроме ФХН200 – 2 % И). Содержание хрома во всех марках составляет 60...68 %. Ферросиликохром (ГОСТ 11861–77). В марке указывается среднее содержание кремния в процентах (ФСХ33 содержит 30–37 %Si). Содержание хрома – от 28 до 55 %. Ферротитан (ГОСТ 4761–80). В марке указывается содержание титана в процентах (ФТи20А, ФТи68). Буквы А или Б в конце марки указывают на разное содержание фосфора. Ферровольфрам (ГОСТ 17293–82) содержит не менее 65 % W. Пример обозначения – ФВ80. Ферромолибден (ГОСТ 4759–79) содержит молибден в количестве, указанном в конце марки в процентах ФМобО. Феррофосфор (ТУ 14-5-72–80) помимо железа содержит фосфор в количестве, указанном после букв (в процентах). Например, феррофосфор ФФ14. Феррованадий (ТУ 14-5-98–78) содержит 85 % V в металле марок Вд35А, Вд35Б и Вд350. Ферробор (ГОСТ 14848–69) содержит 6–20 % В, что отражено в написании марок ФБ6...ФБ20. Флюсы. При плавке чугуна и стали в качестве флюса шире всего используют известняк, основу которого (до 90 %) составляет СаСО<sub>3</sub>. При нагреве известняк распадается с образованием извести СаО и СО<sub>2</sub>. В зависимости от

содержания CaO известняк делится на три сорта (табл. 9.5). Для плавки чугуна можно использовать мел и мрамор (которые по составу аналогичны известняку) свежееобожженную известь (содержит 88–93 % CaO), доломит (30 % CaO, 20 % MgO, - 45 % CO<sub>2</sub>), апатитонепелиновую руду (основной компонент – Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>) и плавиковый шпат (CaF<sub>2</sub>). При плавке цветных сплавов в качестве флюсов широко используются фтористые и хлористые соединения кальция, магния, натрия, а также хлориды алюминия и калия. При плавке цветных сплавов в качестве шихтовых материалов используются: чистые металлы, промежуточные сплавы, возврат, лигатуры. Лигатуры необходимы для ввода в расплав более тугоплавких металлов. Для расчета шихты необходимо знать точный химический состав сплава и точный химический состав вводимых компонентов. Расчет шихты ведется на средний химический состав. Методы расчёта шихты представлены в методических указаниях к практическим работам.

Технологические особенности плавки серых чугунов в различных печах. Плавка чугуна в дуговых печах. Расход электродов составляет 5–7 кг/т чугуна. Электроды диаметром до 550 мм и длиной 1000–1800 мм имеют резьбовые отверстия в торцах. По мере сгорания нижних частей электродов, их наращивают, для чего в верхнюю часть работающего электрода ввинчивают соединительный графитовый ниппель, а на него навинчивают новый электрод. Температура дуги (около 6000 °С) определяет важнейшие достоинства и недостатки печи. Расход электроэнергии на плавку чугуна зависит от емкости печи и составляет от 450 до 1000 кВт ч/т чугуна. Удельная мощность ЭДП – от 200 до 700 кВт/Т загрузки печи позволяет завершить плавку за 2... 1 ч соответственно. Загрузку печей малой емкости ведут через рабочее окно 3. Печи большой емкости загружают сверху, для чего свод приподнимается и поворачивается в сторону. Для слива шлака печь наклоняют в сторону рабочего окна для выпуска металла – в сторону выпускного отверстия 4. Футеровка печей может быть, как кислой, так и основной. Футеровка свода выдерживает не более 200 плавов. Это объясняется тем, что на протяжении всей плавки именно свод испытывает непосредственное воздействие излучения дуги, тогда как под печи подвержен воздействию дуги в значительно меньшей степени (как говорят плавильщики «охлаждается жидким металлом»). Стойкость футеровки пода дуговой печи при качественной его подварке перед каждой плавкой достигает 5000

плавков. Поэтому рядом действующей ЭДП обычно держат запасной свод. Технология плавки. Загрузка шихтовых материалов в печь. Операция загрузки должна быть по возможности быстрой для того, чтобы не допустить охлаждения печи. Вначале на подину следует загрузить 75 % науглероживателя, 50 % мелкой шихты, затем чугунную часть шихты, стальной лом и оставшуюся мелочь. Крупные куски стремятся расположить под электроды. Это обеспечивает заполнение мелочью промежутков между крупными кусками шихты, компактность ее укладки и, как следствие, стабильность горения дуги. Важно отметить, что в дуговой печи можно использовать любую по физическому состоянию шихту – мелкую легковесную, крупную плохо разделанную, т. е. самую дешевую. В первичную садку печи вводят основную часть никеля, кобальта, ферромолибдена и феррофосфора, которые усваиваются без угара. Расплавление. Данный этап плавки проводится путем проплавления глубоких «колодцев» под электродами. В этот период печь работает с максимальным КПД (около 85 %), так как излучений дуги экранируется стенками «колодца» и воздействует только на шихту и торцы электродов. Однако этот период сопровождается треском, грохотом интенсивностью до 100 дБ. Шихта вокруг колодцев зачастую самопроизвольно обрушивается вниз, ломая электроды. Выделение мелкодисперсных твердых частиц, образующихся при разрушении электродов, настолько значительно, что для предотвращения загрязнения ими атмосферы цеха применяется интенсивная вытяжка газов из рабочего пространства печи. Создание разрежения в рабочем пространстве печи приводит к подосу воздуха из атмосферы цеха и, как следствие, к созданию окислительной атмосферы в печи. В связи с этим угар элементов в трехфазных дуговых печах при соблюдении современных санитарных норм в рабочей зоне практически равен угару в вагранке. При появлении жидкого металла приступают к наведению шлака, кислых печах для этого добавляют сухой кварцевый песок (до 2 %) и известь или известняк (до 10 и до 20 % соответственно от массы песка). Для наведения основного шлака добавляют около 3 % известняка от массы шихты. Плавка в дуговых печах характеризуется повышенным растворением в жидком металле водорода и азота. Это объясняется тем, что в зоне горения дуги эти газы существуют в атомарном и частично ионизированном состоянии. В течение всего процесса плавки следует не допускать «закипания» ванны металла,



протекающего по эндотермической реакции:  $[FeO] + [C] = [Fe] + \{CO\} - Q$ . Для этого в шлак периодически добавляют науглероживатель (электродный бой, древесный уголь и др.). Раскисление шлака приводит к раскислению металла, вследствие чего реакция кипения; развития не получает. За 10... 15 мин до полного расплавления мощность, подводившую к печи, сокращают во избежание перегрева и оплавления стен и свода печи открытой дугой. После полного расплавления берут пробу на химический анализ и отливают клин на отбел. Перегрев металла. Процесс перегрева происходит быстро (10–15 °С/мин), но неравномерно – под электродами температура существенно выше, чем у откосов печи. Для выравнивания температуры и химического состава металла по объему ванны в печах емкостью более 20 т часто применяют электромагнитное перемешивание. Доводка металла по химическому составу. Если содержание углерода оказалось выше заданного, вводят стальные отходы для разбавления расплава. Учитывая, что при этом происходит уменьшение концентрации кремния, одновременно со сталью добавляют ферросилиций. Аналогично снижают содержание кремния, если оно оказалось завышенным. В кислых печах присадку, например, ферросилиция можно проводить в любое время, так как угара кремния в кислых дуговых печах практически не происходит, Феррохром вводят ближе к концу плавки. Титан легко окисляется как в кислой, так и в основной печи, поэтому его вводят непосредственно перед выпуском металла. Для лучшего усвоения куски ферротитана, имеющие малую плотность, необходимо «притапливать» в жидкий металл стальными прутками. В основных печах угар кремния возрастает, поэтому ферросилиций вводят ближе к концу плавки. Важнейшим достоинством дуговых печей для плавки чугуна является возможность наиболее полного удаления серы в печах с основной футеровкой. Высокая температура дуги позволяет проводить плавку при максимальной основности шлака и при сохранении его хорошей текучести и активности; высокотемпературный режим плавки обеспечивает высокую активность углерода как восстановителя, а, следовательно, и низкую окисленность металла и шлака. В результате этого в чугуне, выплавленном в дуговой печи с основной футеровкой, содержание серы удается снизить до 0,010–0,03 %, что позволяет получать современные высокопрочные чугуны с шаровидным графитом. Особенности конструкции и технологии плавки чугуна в дуговых печах постоянного тока. В дуговых печах постоянного тока

графитовый электрод подключается к отрицательному полюсу источника питания, что обеспечивает меньший износ его под действием бомбардировки заряженными частицами дугового промежутка. В результате этого: снижается интенсивность разрушения графитовых электродов (их расход уменьшается в 5–9 раз); соответственно уменьшается и количество пылегазовыбросов при плавке; это позволяет уменьшить величину разрежения в рабочем пространстве печи, обеспечивающую отсутствие загрязнения атмосферы цеха; уменьшение подсоса воздуха из атмосферы цеха приводит к снижению концентрации кислорода воздуха в газовой фазе, а, следовательно, и угара металла. Важным преимуществом дуговых печей постоянного тока является возможность интенсивного электромагнитного перемешивания металла. Оно возникает в результате того, что подовые электроды расположены эксцентрично по отношению к оси графитового электрода. Взаимодействие электромагнитного поля дуги с током в жидком металле в этом случае приводит к перемешиванию металла. В результате перемешивания процесс науглероживания значительно интенсифицируется. Выбор частоты тока для питания индукционных тигельных печей. Использование токов повышенной частоты позволяет улучшить показатели плавки и, в частности, увеличить ее производительность, уменьшить угар металла. Толщина поверхностного слоя  $\Delta z$ , в котором циркулируют вихревые токи, зависит от удельного электрического сопротивления металла  $\rho$ , его относительной магнитной проницаемости и частоты тока  $f$ . Эта величина, называемая глубиной проникновения тока, где:  $\Delta z$  – м;  $\rho$  – Ом м;  $f$  – Гц. С увеличением частоты тока глубина проникновения уменьшается. Расплавы с низким электрическим сопротивлением (на основе меди и алюминия) характеризуются меньшей глубиной проникновения тока, чем чугуны и стали. Важно отметить, что при нагреве магнитных сталей и чугунов глубина проникновения тока в них увеличивается примерно в 10 раз при переходе через точку Кюри (730–760 °С в зависимости от марки сплава). Это объясняется тем, что относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков при этом уменьшается от 100 до 1. Для получения удовлетворительного КПД индукционного нагрева диаметр нагреваемого цилиндра должен превышать глубину проникновения не менее чем в 4–5 раз. В этом случае система индуктор–садка работает в области ярко выраженного поверхностного эффекта т. е. в нагреваемом теле существуют

поверхностный токнесущий слой и сердцевина, величиной тока в которой можно пренебречь. Цилиндр меньшего диаметра, помещенный в индуктор, оказывается «прозрачным» для электромагнитных волн, т. е., проходя через него, они не вызывают существенного нагрева. Минимальный диаметр тигля чугуноплавильной печи, работающей на токе промышленной частоты – 50 Гц. Для этого в формулу подставим значения электромагнитных характеристик жидкого чугуна:  $r_{жч} = 1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом · м; относительную магнитную проницаемость  $\mu_{Г} = 1$ ; частоту тока  $f = 50$  Гц. При этом глубина проникновения  $\Delta_{э}$  оказывается равной 0,081 м, или 81 мм. Минимальный диаметр тигля индукционной печи промышленной частоты согласно должен быть:  $d_{ц} \geq (4 \dots 5) \cdot 81 = 324\text{--}405$  мм. Выполнение этого условия обеспечивает возможность перегрева жидкого металла в печи с минимальным приемлемым КПД. Индукционные печи промышленной частоты имеют диаметр тигля не менее 500 мм и емкость не менее 1 т. Однако пуск такой печи на обычной твердой завалке практически невозможен, так как размеры кусков шихты, используемой в чугунолитейном производстве, значительно меньше 324–400 мм. Нагрев реальной шихты на токе промышленной частоты возможен только до температуры точки Кюри, плавку в печах промышленной частоты ведут с использованием переходной ванны (с «болотом»). Для этого при выпуске предыдущей плавки в тигле оставляют так называемое «болото» – не менее 1/3 объема жидкого металла. Технология плавки чугуна в печах промышленной частоты с «болотом» требует обязательного удаления с поверхности кусков шихты влаги, масел и эмульсии во избежание выбросов жидкого металла. Для этого шихту подогревают газом до температур порядка 500 °С в специальных нагревательных бадьях. Первая плавка на холодной печи при отсутствии жидкого металла в цехе проводится с использованием пусковых болванок. Они представляют собой слитки, диаметр которых близок к диаметру тигля и, следовательно, удовлетворяет условию эффективного индукционного нагрева. В настоящее время существуют чугуноплавильные индукционные печи промышленной частоты емкостью от 1 до 60 т, имеющие в российских каталогах буквенный индекс ИЧТ (индукционная чугуноплавильная тигельная печь). Числа, указанные после данного индекса, означают емкость тигля в тоннах и через косую черту мощность печи в мегаваттах, например, ИЧТ31/7,1. Если по условиям производства плавку чугуна

в индукционных тигельных печах необходимо вести на твердой завалке без переходной ванны, частота тока для этих печей должна соответствовать размерам кусков используемой шихты. Если диаметр куска ориентировочно равен 40 мм, тогда глубина проникновения тока, должна составлять величину порядка 10 мм, т. е. 0,01 м, а частота тока должна быть порядка 2400 Гц. На такой частоте работают печи емкостью 60–400 кг для плавки стали и чугуна. Расчеты, показывают, что при постоянной величине тока в индукторе наибольшая удельная мощность (т. е. мощность, отнесенная к единице объема металла) выделяется в кусках, имеющих форму цилиндра, диаметр которого равен  $3,5\Delta\text{Э}$ . Для кусков шихты в форме пластин максимальная удельная мощность соответствует условию: толщина пластин  $\delta = 2,5\Delta\text{Э}$ , для шара его диаметр  $d = 4,8\Delta\text{Э}$ . Поэтому оптимальной шихтой для плавки на частоте 2400 Гц будут цилиндрические куски диаметром 35 мм, пластины толщиной 25 мм или шаровидные куски диаметром 50 мм. Легированные чугуны для отливок выплавляются в сравнительно небольших количествах, поэтому для их плавки используют среднечастотные печи серии ИСТ (индукционные сталеплавильные тигельные). Взаимодействие тока в индукторе с током, индуцированным в поверхностном слое жидкого металла в тигле, приводит к возникновению электродинамических сил  $F$ , действующих на жидкий металл и направленных к оси тигля. Под действием электродинамических сил  $F$  возникает двухконтурная циркуляция металла, интенсивность которой можно визуально оценить по высоте выпуклого мениска  $H_t$  на свободной, поверхности ванны металла. В результате электромагнитного перемешивания происходит выравнивание температуры и химического состава металла в объеме ванны. Быстрее проходят процессы растворения легирующих элементов и науглероживания. Однако чрезмерная интенсивность перемешивания приводит к нарушению сплошности шлакового покрова, так как шлак стекает к стенкам тигля. В результате этого увеличивается угар металла, усиливается растворение в нем газов и, кроме того, возможны газометаллические выбросы. Технология модифицирования. Модифицирование является наиболее простым, эффективным и, поэтому, самым распространенным способом повышения прочностных свойств чугуна. В качестве модификатора при производстве отливок серого чугуна чаще всего используют ферросилиций ФС75, обладающий одновременно раскисляющей и графитизирующей способностями. За

счет его свойств можно получить мелкозернистую структуру отливки, снизить отбел и повысить механические свойства металла. Количество модификатора зависит от различных производственных условий и увеличивается от 0,2–0,4 % для СЧ25 до 1,5–2 % для СЧ45. Обычно модификатор вводят в ковш под струю металла, на желоб, в литниковую чашу или в форму. Размер зерен модификатора составляет 2–5 мм при обработке жидкого металла массой до 2 т и 5–15 мм при обработке больших количеств. В зависимости от способа ввода модификатора может усваиваться 70–90 % (кремния). Перед употреблением модификатор прокаливают при 300–400 °С в течение 1–2 ч. Пылевидные фракции размером менее 0,5 мм отсеивают. Температура металла при выпуске из печи составляет обычно 1420–1460 °С, она должна быть тем большей, чем выше марка чугуна. После ввода модификатора металл целесообразно перемешать для равномерного распределения его в объеме ковша. Во избежание потери эффекта модифицирования выдержка чугуна после добавки модификатора не должна превышать его живучести. Эта величина для ферросилиция ФС75 в зависимости от емкости ковша составляет: Масса металла в ковше, т До 0,5 0,5...2 2... 10 Допустимая выдержка, мин ...3...5 5...8 8... 10 Силикокальций может использоваться самостоятельно в количестве 0,3–0,6 % от массы жидкого чугуна, а также в смеси с ферросилицием ФС75 в соотношении 1 : 1 или с ФС75 и графитом в зернах. Алюминий в смеси с ферросилицием или с графитом эффективно предотвращает отбел чугуна. Графит черный – наиболее простой и дешевый модификатор, предотвращающий отбел на тонкостенных отливках. Силикобарий является комплексным модификатором с повышенной живучестью. Важно отметить, что для достижения максимального эффекта модифицирования исходный чугун должен иметь пониженный углеродный эквивалент и при затвердевании без модифицирования образовывать структуру белого или половинчатого чугуна. Модификатор вводится в таком количестве, что углеродный эквивалент модифицированного чугуна оказывается равным его величине в немодифицированном чугуне, имеющем структуру на грани отбела для данной толщины стенки отливки. Большое значение имеет обработка чугуна жидкими синтетическими шлаками с целью снижения содержания серы, фосфора, неметаллических и газовых включений. Синтетический шлак на основе извести (60–70 %) и плавикового шпата (5–10 %) готовят в специальной шлаковой

печи, затем сливают в ковш и заливают в него жидкий чугун. При этом происходит эмульгирование мельчайших капель шлака в чугуне и существенно возрастает величина межфазной поверхности металл-шлак. В результате такой обработки содержание серы в чугуне снижается на 90 % от первоначального.

Технологические особенности плавки стали в дуговых печах. Основные этапы плавки сталей. Дуговая электропечь состоит из корпуса, футерованного изнутри кислой или основной футеровкой, съемного свода с отверстиями для электродов. Шихту загружают на набивную часть пода. Между электродами и шихтой или расплавленным металлом в рабочем пространстве печи горят электрические дуги. Излучаемое при этом тепло обеспечивает расплавление шихты и нагрев жидкого металла до требуемой температуры. Для выпуска стали и шлака служат выпускное отверстие (летка) и желоб. При этом печь наклоняют в сторону летки с помощью опорных секторов. Для удаления («скачивания») шлака по ходу плавки печь наклоняют в сторону рабочего окна. Печи при выпуске металла наклоняют на угол до  $42^\circ$ , а при скачивании шлака – до  $120^\circ$ . По конструкции дуговые печи бывают с выкатным подом, с откатным сводом и с поворотным сводом. Наибольшее распространение получили печи с поворотным сводом, поскольку в этом случае упрощается конструкция печи, и она занимает меньшую площадь. Загрузка печи осуществляется сверху бадьей во всех типах печей. Для обслуживания печи в процессе плавки (присадка различных материалов, взятие проб для экспресс анализа и других случаях). В очень редких случаях печи малой вместимости могут загружаться через рабочее окно. После выпуска выплавленного металла необходимо подготовить ДСП к следующей плавке. Первой операцией является осмотр подины и откосов печей. Подина не должна иметь ям, откосы выведены выше уровня шлака. Исправление (заправка) подины осуществляется огнеупорным материалом, состоящим для основной печи из смеси магнезитового порошка, смешанного с обезвоженной смолой, пеком или жидким стеклом, для печи с кислой футеровкой – смесью, состоящей из молотого кварцита или чистого кварцевого песка и жидкого стекла. Исправление футеровки большегрузных печей осуществляют специальными заправочными машинами. Операция заправки занимает 5–10 мин. После этого приступают к загрузке шихты. Чтобы шихта хорошо расплавлялась, необходимо в ней иметь не менее 30 % крупного лома

и не более 20–30 % стружки. На подину загружают стружку и часть легковесной шихты. Это предохраняет подину от разрушения под воздействием ударов тяжелого лома. Верхнюю часть печи заполняют мелкой шихтой, чтобы электроды быстро проплавливали колодцы в шихте, что в свою очередь способствует экранированию дуг и лучшей отдаче тепла. При плавке в печах с основной футеровкой, проводимой с окислением, в нижние слои шихты добавляют по 2–3 % железной руды и извести. Плавка стали основным процессом. Основным процессом могут выплавляться все группы марок сталей, но выплавляют наиболее ответственные. Плавку можно осуществлять двумя способами: с окислением и методом переплава. Переплав, или плавку без окисления осуществляют на качественной шихте, чистой по фосфору и сере. Плавка с окислением технологически сложнее. Она состоит из следующих этапов: 1) заправка печи; 2) загрузка шихты; 3) плавление шихты и окислительный период; 4) восстановительный период; 5) доводка по химическому составу и выпуск металла. Заправку печи производят после выпуска каждой плавки и, как отмечалось выше – смесью на основе магнезитового порошка. В некоторых случаях допускается использовать для этих целей доломит, хромистый железняк и др. Шихту составляют таким образом, чтобы после расплавления содержание углерода в расплаве на 0,2–0,4% превышало заданное. Вместе с шихтой загружаются по 2–3 % извести и железной руды для формирования шлака, и удаления фосфора. Во время плавления фосфор до 50 % от его содержания в шихте переходит в шлак, в котором содержание  $P_2O_5$  повышается до 1,5%. После полного расплавления шихты частично скачивают шлак, добавляют в печь известь и руду и приступают к окислительному периоду. Задача этого периода – дальнейшая дефосфорация металла и достижение заданного состава стали и температуры. Интенсифицируется окислительный период продувкой кислородом через специальные фурмы. Использование кислорода существенно увеличивает скорость выгорания углерода. При окислении рудой она составляет 0,3–0,6 % С/ч, при продувке кислородом – 1,5 % С/ч. Расход кислорода составляет до 5 м<sup>3</sup>/т стали, при этом сокращается длительность окислительного периода на 15–25 мин, увеличивается производительность печей на 5–12 %, снижается расход электроэнергии на 5–10 %. Интенсивное кипение ванны, вызванное окислением углерода, значительно снижает содержание азота в металле, причем эффективность дегазации возрастает с увеличением

скорости продувки. К концу продувки содержание углерода в расплаве должно быть примерно на 0,1 % ниже минимального предела для выплавляемой марки стали, но не ниже 0,1 %, чтобы предотвратить переокисление металла, за исключением тех случаев, когда выплавляются стали, в которых углерод является нежелательной примесью (например, в некоторых марках нержавеющей стали). В конце окислительного периода содержание фосфора в стали не превышает 0,01 %, а шлак, количество которого составляет 1–2% от массы металла, имеет состав, %: CaO (40–50); SiO (10–20); FeO (15–20); MnO 5–12); MgO (6–10); Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (2–3); P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> до 1,5. Кроме углерода и фосфора в этот период удаляются Si, Mn и другие легко окисляемые примеси. В этот же период плавания стали окисляется и хром. Скармливание шлака после расплавления и постепенное его обновление в течение окислительного периода способствуют дальнейшему окислению хрома и удалению его со шлаком. Оксиды хрома снижают жидкоподвижность шлака, затрудняя процесс окисления фосфора. Поэтому использование в шихте хромосодержащих отходов при плавках с полным окислением нецелесообразно. После окончания продувки или присадки последней порции руды делают выдержку 5–10 мин, в течение которой отбирают пробу на анализ и измеряют температуру расплава. Продолжительность окислительного периода составляет 30–60 мин. За это время может быть удалено до 50 % серы, вносимой шихтой. Этому способствуют высокая основность шлака (2,7–2,8) и его постоянное обновление. После окончания окислительного периода сталь раскисляют.

Плавка стали кислым процессом. По сравнению с основным кислый процесс обладает целым рядом преимуществ: меньшими тепловыми потерями и более низким расходом электроэнергии, нагрев металла осуществляется быстрее; меньшей длительностью плавки и более низким расходом электродов; высокой стойкостью футеровки и меньшим расходом огнеупоров; более низкой стоимостью и меньшей дефицитностью огнеупорных материалов; более высокой производительностью печей. Основными недостатками кислого процесса являются: необходимость применения шихтовых материалов, чистых по фосфору и сере; трудности выплавки высокомарганцовистых сталей, так как кремний восстанавливается из футеровки марганцем, при этом содержание кремния в стали резко возрастает, а футеровка печи разрушается. По



этой же причине в кислых печах не плавят стали, содержащие алюминий, титан, ванадий. Особенностью кислого процесса является ведение плавки под шлаком, содержащим до 65 % кремнезема. Под таким шлаком фосфор и сера не удаляются, поэтому шихта должна содержать этих элементов на 0,01 % меньше, чем готовая сталь. Наилучшие показатели плавки достигаются при использовании 60–75 % крупной шихты, 25–30 % мелкой, в том числе до 12 % стальной стружки. Завалку проводят так, чтобы крупный лом находился в зоне действия электрических дуг, а мелкий – на откосах и поверх крупного лома. Расплавление шихты происходит так же, как и в основной печи. В период плавления образуются оксиды железа (есть они и непосредственно в шихте), которые окисляют кремний и марганец шихты. Если в шихте есть ванадий или хром, то они тоже окисляются. Таким образом, на подине формируется шлак, который растворяет и некоторое количество кремнезема футеровки. Примерный состав этого первичного шлака: 40–50 %  $\text{SiO}_2$ ; 15–30%  $\text{FeO}$ ; 10–30%  $\text{MnO}$ ; 2–6%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 5–15% прочих оксидов. При простом переплаве шихту составляют таким образом, чтобы содержание углерода было на 0,1 % ниже марочной концентрации, поскольку в процессе плавки углерод электродов будет переходить в расплав. В этом случае выплавка сталей состоит из следующих периодов: загрузки шихты, расплавления, доводки по химическому составу и температуре, раскисления и выпуска металла в ковш. При кислой электроплавке применяют также кремневосстановительный и активный процессы. Чаще используют активный процесс. При использовании этого процесса после расплавления в стали содержание углерода превышает требуемое на 0,1–0,3 %. Железная руда в количестве до 1 % от завалки дается в завалку при выплавке углеродистых сталей или в процессе расплавления шихты, если в ней содержится хром или повышенное количество кремния. В процессе окисления выгорает до 0,2 % C, и в процессе кипения ванны осуществляется хорошая дегазация стали, что предупреждает брак по газовой пористости. Чтобы предупредить восстановление кремния из футеровки, во время кипения в шлак добавляют мелко раздробленный известняк. Шлак окислительного периода удаляют только при выплавке ответственных марок стали после чистого кипения. Длительность окислительного периода составляет 30–50 мин при выплавке легированных и 20–30 мин при выплавке углеродистых сталей. Технологические особенности плавки стали в индукционных

печах. Индукционные печи нашли широкое применение при выплавке стали в цехах мелкого литья. Отечественная промышленность выпускает печи: высокочастотные (100–200 кГц), средней частоты (500–1000 Гц), промышленной частоты (50 Гц). Для преобразования частоты применяются вращающиеся (ВПЧ) и тиристорные (ТПЧ) преобразователи частоты. Последние обеспечивают существенную экономию затрат вследствие компактности расположения плавильного агрегата, а также снижения шума в цехе. Кроме того, при использовании ТПЧ ток индуктора и частота регулируются автоматически в зависимости от состояния металла в печи и степени заполнения ее шихтой. Печи средней частоты позволяют увеличивать подводимую мощность по сравнению с печами промышленной частоты, что приводит к снижению времени расплавления шихты. Основные преимущества индукционных плавильных печей перед дуговыми электропечами следующие: 1) угар легирующих элементов, присутствующих в шихте и ферросплавах, незначительный; 2) хорошее перемешивание жидкого металла способствует выравниванию температуры по всему объему ванны и обеспечивает большую однородность химического состава стали; 3) нет науглероживания металла от электродов. Это позволяет переплавлять высоколегированные отходы без добавок низкоуглеродистой заготовки; 4) высокая вязкость шлаков, их малая жидкоподвижность способствуют защите металла от проникновения газов (водорода и азота) из атмосферы; 5) компактность самой печи позволяет помещать ее в закрытые емкости, где возможно создавать не только необходимую атмосферу, но и вакуум, т. е. можно вести плавку и разливку металла под вакуумом. Недостатков у индукционных печей немного: 1) трудность проведения процессов десульфурации и дефосфорации из-за высокой вязкости шлака и его низкой температуры; 2) относительно невысокая стойкость футеровки. Для плавки стали в индукционных печах требуется относительно чистая по сере и фосфору шихта. Выплавку ведут чаще всего методом переплава. Состав шихты должен обеспечивать после расплавления содержание всех элементов, близкое к заданному в готовом металле. В этих печах выплавляют все марки сталей, в том числе легированные и высоколегированные с практически полным сохранением дефицитных дорогостоящих легирующих элементов (никель, молибден, вольфрам и др.). Всю плавку можно разделить на два периода: расплавление и доводка, причем продолжительность

последней обычно не превышает 30 мин. При производстве стальных отливок преимущественно применяют печи с кислой футеровкой. При этом в первые 5–6 мин мощность печи увеличивают постепенно. Затем мощность поднимают до максимальной, добиваясь быстрого расплавления шихты. Этот процесс желательно вести под шлаком, состав которого подбирают таким образом, чтобы он не смешивался с расплавленным металлом, т. е. шлак должен обладать высоким поверхностным натяжением. Нагрев шлака в печи происходит от металла, т. е. он всегда холоднее металла. Увеличения активности шлака можно достичь повышением его жидкоподвижности присадками плавикового шпата.

Модифицирование. Виды модификаторов и их действие для чугунов. Виды модификаторов и их действие для легких сплавов. В процессе совершенствования различных методов модифицирования чугуна расширяется ассортимент рекомендуемых сплавов. Достаточно указать, что только графитизирующих присадок насчитывается свыше сотни, а модификаторов для получения ЧШГ – в несколько раз больше. Естественно, что практически невозможно описать характеристики всех комплексных модификаторов. Поэтому рассмотрим предъявляемые к ним требования и проанализируем влияние лигатур на основе магния, кальция, бария, иттрия и РЗМ. При сопоставлении различных видов модификаторов в первую очередь необходимо учитывать технико-экономические показатели. К ним относятся стоимость и трудозатраты на получение модификатора, расход на тонну литья, необходимость затрат на создание оборудования для организации процесса, токсичность, пироэффект и стабильность процесса модифицирования. Ко второй группе факторов, не менее важной по значению, следует отнести физико-химические свойства металлов и сплавов, используемых в качестве модификаторов. К ним в первую очередь относятся плотность в жидком состоянии, окисляемость, растворимость в чугуне, десульфурierende способность. Важными характеристиками являются также продолжительность сфероидизирующего эффекта, упругость паров компонентов, температуры плавления, кипения и целый ряд других свойств. В третью группу входят параметры, характеризующие влияние модификатора на структуру и физико-химические свойства чугуна. Это – влияние модификаторов на форму графита, на отбеливаемость чугунов и механические свойства, на литейные свойства чугуна и др. свойства. Комплексное сопоставление

этих трех групп факторов дает основание для выбора и использования того или иного сплава. Естественно, что для различных видов модификаторов может быть предпочтительной одна группа факторов перед другой. Повышение их служебных качеств можно получить изучением влияния добавляемых компонентов на изучаемые параметры. Хотя формированию шаровидного графита способствуют многие химические элементы (церий, кальций, литий и др.), магний и лигатуры с его содержанием остаются наиболее экономичными и перспективными сфероидизаторами графита при производстве ЧШГ. Остаточное содержание магния в чугунах, обеспечивающее полную сфероидизацию графита и требуемый комплекс физико-химических и служебных свойств ЧШГ, обычно составляет 0,03–0,06% и зависит от количества серы, кислорода и других примесей в исходном чугуне. Магний и сплавы на его основе. Магний относится к одним из первых металлов, которые начали использовать для получения ЧШГ. Взаимную растворимость жидких металлов связывают обычно с типом кристаллической структуры растворителя, с относительных размеров атомов, а также с валентными и электрохимическими факторами. Железо обладает ОЦК решеткой, тогда как магний имеет гексагональную упаковку. С другой стороны, атомы железа на 19–20 % меньше атомов магния. Такое различие в структурах и размерах приводит к ограничению взаимной растворимости этих элементов в жидком состоянии. Будучи активным элементом, магний вступает в соединение с серой и кислородом, растворенными в чугуне, и присутствует в расплаве в виде соединений относительно MgS, MgO, Mg<sub>2</sub>Si и др. Вследствие низкой температуры кипения и высокой упругости пара, в промышленных условиях магний целесообразно применять только в установках, обеспечивающих безопасные условия работы. Согласно ГОСТ 804–93 технически чистый первичный магний поставляется в чушках массой 8 кг трех марок Мг 96, Мг 95 и Мг 90. Чушки из магния необходимо хранить в сухих закрытых, хорошо вентилируемых складских помещениях. Существенным недостатком, ограничивающим применение технически чистого Mg для получения ЧШГ, является бурное протекание реакции с расплавом чугуна, сопровождаемое обильным дымовыделением и пироэффетом. Плавка и модифицирование алюминиевых сплавов. Плавка большинства алюминиевых сплавов не составляет трудностей. Легирующие компоненты, за исключением магния, цинка, а иногда и меди, вводят в виде лигатур. Медь вводят в

расплав при 740–750 °С, лигатуру Al–Si – при 700–740 °С; цинк загружают перед магнием, который обычно вводят перед сливом металла. Загрузку шихтовых материалов ведут в следующей последовательности; чушковой алюминий, крупногабаритные отходы, переплав, лигатуры или чистые металлы. Максимально допустимый перегрев для литейных сплавов 800–830 °С, для деформируемых 750–760 °С. При плавке на воздухе алюминий окисляется. Основными окислителями являются кислород и пары воды. Содержание влаги в воздухе в зимнее время составляет 2–4,5 г/м<sup>3</sup>, в летнее 18,5–23 г/м<sup>3</sup>; продукты горения жидкого или газообразного топлива могут содержать от 35 до 70 г/м<sup>3</sup> водяного пара, на поверхности жидкого алюминия образуется плотная, прочная пленка оксида толщиной 0,1–0,3 мкм. При достижении такой толщины окисление практически приостанавливается, так как скорость диффузии кислорода через пленку резко замедляется. Скорость окисления сильно возрастает повышением температуры расплава. Щелочные и щелочноземельные металлы (K, Na, Li, Ba, Ca, Sr, Mg), а также цинк (0,05–0,1 %) сильно увеличивают окисляемость алюминия из-за образования, рыхлых оксидных плен. Наиболее существенное влияние на степень загрязнения расплавов пленами оказывает поверхностная окисленность исходных: первичных и вторичных шихтовых материалов. Наиболее вероятная толщина оксидных плен 0,1–1 мкм, а протяженность – от десятых-долей миллиметра до нескольких миллиметров. При выстаивании расплавов крупные включения могут всплывать или осаждаться. Однако ввиду большой удельной поверхности плен и малого отличия их плотности от плотности расплавов всплывание (осаждение) идет медленно, большая часть плен остается в расплаве и при заполнении формы увлекается в отливку. Неметаллические включения способствуют развитию в отливках усадочных рыхлот и пористости. Такие отливки не выдерживают обычно испытаний на гидро- или пневмоплотность. Оксидные пленки снижают жидкотекучесть расплавов и ухудшают заполнение тонких полостей литейных форм. Во время плавки алюминий насыщается водородом, содержание которого может достигать 1–1,5 см<sup>3</sup> на 100 г металла. Основным источником водорода являются пары воды, парциальное давление которых в атмосфере газовых плавильных печей может составлять 8–16 кПа. Оксидная пленка на шихтовых материалах также является источником насыщения расплава водородом, так как на 30–60 % состоит из

$Al(OH)_3$ . Кинетика процесса наводороживания алюминиевых расплавов лимитируется массопереносом водорода в жидком металле, через поверхностную оксидную плену и в газовой среде. Наиболее существенное влияние на массоперенос оказывают состав сплава и содержание неметаллических включений, определяющих проницаемость оксидной пленки и диффузионную подвижность водорода. На проницаемость пленки существенное влияние оказывает также состав газовой среды. Диффузионную подвижность водорода в алюминии уменьшают медь, кремний, магний, марганец и титан. Наиболее активно действуют три последних элемента. Сильно замедляют диффузионную подвижность тонкодисперсные неметаллические включения, обладающие высокой адсорбционной способностью по отношению к водороду. Пленка оксида алюминия обладает малой проницаемостью для атомов водорода, она замедляет реакции взаимодействия расплава с влагой атмосферы. При толщине пленки 1 мкм газообмен между металлом и атмосферой практически прекращается. Все элементы, увеличивающие окисляемость алюминия (Mg, Li, Na, Sr, Ca), увеличивают проницаемость оксидной пленки для водорода. Медь, цинк и кремний мало влияют на газообмен. Содержание водорода в алюминиевых расплавах в производственных условиях определяют методом Дарделла–Гудченко (по выделению первого пузырька газа) или методом вакуумной экстракции твердого образца. Пористость отливок оценивают обычно по пятибалльной шкале ВИАМ. Модифицированием называется процесс искусственного изменения структуры литого металла или сплава под воздействием небольших количеств специально вводимых добавок. Модификаторы либо увеличивают число зародышей и тем самым способствуют получению мелкозернистой структуры, либо уменьшают скорость роста кристаллов и изменяют их форму и размеры. Роль модификаторов сводится, к уменьшению поверхностного натяжения на гранях кристалла, что благоприятствует увеличению скорости зарождения центров кристаллизации и устойчивости зародышей малых размеров, с другой стороны, – к образованию на поверхности адсорбционных пленок, препятствующих диффузии атомов кристаллизующегося вещества к поверхности кристаллов и тормозящих их рост. К первой группе относятся такие модификаторы, которые образуют в расплаве высокодисперсную, иногда коллоидно-дисперсную «взвесь», тугоплавкие металлы или их соединения, частицы которых могут

находится во взвешенном состоянии в предкристаллизационный период. Ко второй группе модификаторов относятся элементы или их соединения, которые могут адсорбироваться на гранях, зарождающихся кристаллов и тормозить их рост. По данным Л. К. Лемихова и Г. В. Самсонова, элементы, состоящие в начале периодов таблицы Д. И. Менделеева и имеющие наибольшую дефектность электронного  $d$  – уровня, относятся к числу наиболее активных модификаторов. При понижении температуры, когда упорядоченные скопления атомов становятся более устойчивыми, атомные группировки прочнее, если в них вместе с алюминием присутствуют металлы переходных групп. Такая комбинация энергетически более выгодна. Поверхностно-активными являются обычные вещества с низкой температурой плавления, сравнительно мягкие, обладающие малым значением поверхностной энергии в расплавленном состоянии на границе с воздухом. К таким веществам относятся щелочные и щелочноземельные металлы. Действие их проявляется обычно при концентрациях от 0,001 до 0,1 % (доэвтектические и эвтектические сплавы системы Al – Si для превращения грубой эвтектической структуры, содержащей игольчатые кристаллы кремния, в мелкодисперсную структуру вводят до 0,08 % Na). Модифицирование металлическим натрием. Натрий в количестве 0,05–0,1 % массы шихты вводят в расплав с помощью колокольчика при температуре 750–800 °С. Предварительно натрий очищают фильтровальной бумагой от керосина, в котором он хранится, и завертывают в алюминиевую фольгу. Процесс модифицирования натрием продолжается несколько минут и сопровождается выделением пламени и сильным бурлением жидкого металла. Металл разливают в формы через 10–15 минут после введения натрия. Модифицирование двойным модификатором. Двойной модификатор состоит из смеси фтористого и хлористого натрия состава: 67 % NaF и 33 % NaCl. Эти соли образуют сплав эвтектического типа с эвтектикой, находящейся при 34,5 % (по массе) NaF и температурой плавления 675 °С. Соли перед употреблением тщательно просушивают во избежание появления в отливках газовой пористости, хорошо перемешивают и размельчают в шаровой мельнице или в бегунах. Размельченные соли просеивают через сито с отверстиями 0,5–0,75 мм. Затем соли подают на участок заливки и хранят при температуре выше 100 °С. Модифицирование универсальным флюсом. Обработка расплава производится так же.

Содержание натрия в алюминиево-кремниевых сплавах должно составлять 0,08–0,1 %, в противном случае будет наблюдаться явление «перемодифицирования», и свойства сплавов ухудшатся; – Следует строго выдерживать режимы модифицирования (температура, продолжительность); заниженная температура или недостаточная выдержка расплава под слоем солей снижает эффект модифицирования. При использовании тугоплавкими модификаторами с повышенным содержанием фторидов требуется значительных перегрев расплава. Применение тугоплавких модификаторов целесообразно только в двух случаях: – При литье деталей из сплавов с повышенным содержанием кремния, например, из сплава АК12, когда требуется наиболее высокая модифицирующая активность флюса; – При литье крупногабаритных тонкостенных деталей, оформление которых требует перегрева расплава. После снятия солей сплав должен быть разлит в течение 25–30 минут, иначе выгорание натрия из расплава приведет к получению в отливках немодифицированной структуры и понижению механических свойств деталей.

**Модифицирование стронцием.** Стронций обладает рядом существенных преимуществ, по сравнению с натрием, и обеспечивает стабильный модифицирующий эффект, сохраняющийся в течение нескольких часов и при повторных переплавах. Оптимальная концентрация стронция – около 0,04 %, температура модифицирования 750–770 °С. Отмечается, что обработка расплава хлором, а также введение фосфора может снять модифицирующий эффект.

**Модифицирование фосфором.** Фосфор значительно увеличивает длительность действия эффекта модифицирования эвтектических силуминов. Плотность эвтектических силуминов, модифицированных фосфором выше, чем модифицированных натрием. Длительность сохранения эффекта модифицирования фосфором примерно в 2 раза выше, чем при модифицировании натрием. При модифицировании фосфором происходит резкое уменьшение количества крупных кристаллов кремния. Плавка и модифицирование магниевых сплавов. Сплавы легко окисляются, на поверхности расплавов образуется пористая пленка оксида ( $V_{MgO}/V_{Mg} < 1$ ), не предохраняющая их от окисления и загорания. Окисление замедляется в атмосфере сернистого газа ( $SO_2$ ) или углекислоты ( $CO_2$ ). Взаимодействие с сернистым газом при 700–750 °С сопровождается образованием на поверхности расплава тонкой пленки сульфата магния ( $MgSO_4$ ), затрудняющей доступ



кислорода к расплаву. Резко снижает окисление магниевых сплавов введение в них 0,001–0,002 % бериллия или 0,03–0,05 % кальция, оксиды которых уплотняют оксидную пленку на поверхности расплавов. Магниево-водородные расплавы, обогащенные водородом и оксидами, предрасположены к образованию микропористости в отливках. Цирконий, церий, лантан, иттрий, кальций и титан взаимодействуют с водородом с образованием гидридов. Вводя их в магниевые расплавы, снижают выделение водорода в процессе кристаллизации и предотвращают образование газовой и газоусадочной пористости. Для предотвращения интенсивного взаимодействия с печными газами плавку магниевых сплавов ведут под флюсами или в среде защитных газов. Покровные флюсы для магниевых сплавов состоят из смеси хлористых и фтористых солей щелочных и щелочноземельных металлов. Основой хлоридных и хлоридно-фторидных флюсов является карналлит  $MgCl_2 \cdot KCl$ . Плавку в стационарных тиглях ведут при массовом или крупносерийном производстве мелких отливок. Стальной толстостенный литой тигель нагревают до 400–500 °С и загружают в него флюс ВИ2 в количестве до 10 % от массы шихты. Флюс расплавляют, затем небольшими порциями загружают в него подогретые до 120–150 °С шихтовые материалы. После введения всех составляющих шихты расплав нагревают до 700–720 °С и проводят рафинирование и модифицирование. Выстаивают сплав 10–15 мин, отбирают пробы на химический и спектральный анализы и излом, а затем при помощи ручных ковшей разливают металл по формам. Остаток металла (20–30 % от объема расплава в тигле), загрязненный оксидами и флюсом, сливают после каждой плавки и используют для производства подготовительных сплавов. Плавка и модифицирование латуней. Плавку двойных латуней производят в индукционных канальных печах типа ИЛК и ИЛКА, так как эти печи наиболее экономичны и обеспечивают хорошее качество жидкого металла. Футеровка печей – кварцевая, либо высокоглиноземистая (66 %  $SiO_2 + 32\% Al_2O_3$ ). Особенностью плавки латуней является высокая упругость паров цинка в расплавленном состоянии (температура кипения цинка 907 °С). При плавке латуней потери металла в виде угара цинка достигают заметных значений – от 0,5 до 5,0 %. На поверхности расплава  $Cu-Zn$  образуется оксидная пленка (шлак)  $ZnO$ , ее защитные свойства невысокие из-за низкой прочности. Применяют флюсы наиболее известным является стекло

(т-  $\text{SiO}_2$ -  $n\text{Na}_2\text{O}$ ) с различными разжижающими добавками. Хорошо зарекомендовали себя в работе флюсы (60 %  $\text{NaCl}$ ; 30 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ; 10 %  $\text{Na}_3\text{AlFr}$ ), углеродсодержащие покрытия (древесный уголь, графитовый бой) с добавками солей (криолит, сильвинит, смесь буры с  $\text{NaCl}$  и др.). При плавке кремнистых латуней применяют флюс, состоящий из 50 % стекла и 50 % плавикового шпата. При выплавке двойных латуней сначала под слоем древесного угля расплавляют медь, затем в расплав вводят цинксодержащие отходы и вторичную латунь. Сплав нагревают до 1000–1050 °С и перед заливкой в него вводят цинк. Медь перед введением цинка или цинксодержащих отходов раскисляют фосфором. Легирующие элементы, особенно тугоплавкие, вводят в печь в виде лигатур  $\text{Cu-Fe}$ ,  $\text{Cu-Mn}$ ,  $\text{Cu-Ni}$ ,  $\text{Cu-Mn-Al}$  и др. Литейные латуни плавят как в индукционных канальных печах, так и в индукционных тигельных. Плавка и модифицирование оловянных бронз. Шихтой для приготовления литейных оловянных бронз служат либо готовые сплавы, либо чистые металлы. Оловянные бронзы плавят в индукционных печах. Плавка оловянных бронз из шихты на основе чушковой бронзы состоит из четырех основных периодов: загрузки, расплавления, перегрева и рафинирующе-дегазирующей обработки расплава. Плавку в индукционных печах ведут в графито-шамотных, либо в графито-карборундовых тиглях. После расплавления всей шихты расплав перегревают до 1150–1200 °С (на 100–200 °С выше температуры ликвидуса) и вводят фосфористую медь в количестве 0,02–0,04 %. Присадки фосфора в оловянные бронзы, содержащие цинк, благоприятно действуют на образование жидких продуктов раскисления (фосфатов  $3\text{ZnOP}_2\text{O}_5$ ), легко удаляемых из расплава по сравнению с твердыми, вязкими оксидами цинка. При выплавке оловянных бронз из чистых металлов плавку начинают с расплавления меди, которую загружают в печь сразу полностью или по частям. Плавку меди ведут форсированно под покровом древесного угля. Если в состав шихты входит никель, то его загружают либо вместе с медью, либо вводят (растворяют) подогретым в жидкий металл. Никель повышает равновесную растворимость водорода в меди, поэтому введение его в расплав на более поздней стадии предпочтительнее. Поэтому перед введением олова или оловосодержащих отходов медь раскисляют фосфором, при плавке в тигельных индукционных печах, необходимо 0,005–0,02 % фосфора. Плавка и модифицирование безоловянных бронз. Плавку

ведут в окислительной атмосфере графито-шамотных (или карборундовых) тиглей и в печах, футерованных шамотом. При плавке в канальных печах применяют кварцевую ( $\text{SiO}_2$ ) или глиноземистую футеровку. В состав шихты входят возвраты, количество которых варьируется от 25 до 75 %. Также быстрее и лучше железо растворяется в расплаве  $\text{Cu-Al}$ . Поэтому после расплавления меди и ее раскисления фосфором иногда дают в ванну печи часть алюминия (примерно  $1/3$ – $1/5$  от расчетного количества). При этом ванна разогревается (благодаря экзотермическому характеру растворения алюминия в меди) и вводят железо и марганец, а затем уже остальное количество алюминия, применяют покровы из древесного угля вместе с легкоплавкими солями (криолит, бура и др.) в соотношениях (2–3): 1. В практической работе применяют внепечное рафинирование алюминиевых бронз жидкими флюсами в ковше. В этом случае флюс плавят в отдельном металлическом тигле, переливают его в подогретый ковш в количестве 2–3 % от массы металла и затем в этот ковш заливают готовый расплав алюминиевой бронзы из печи. Происходит хорошее перемешивание расплава и флюса и эффективное рафинирование металла от неметаллических включений выдержкой расплава в течение 3–10 мин для удаления продуктов обработки из металла. В случае сильного загрязнения шихты плавку ведут под флюсами. Рафинирование алюминиевых бронз производят также продувкой азотом высокой чистоты или аргоном. Оптимальный удельный расход газов 0,05 л/(мин×кг), время продувки 5–7 мин. При продувке алюминиевых бронз недопустим интенсивный барботаж расплава, что может привести к дополнительному окислению металла. Взаимодействие металлических расплавов с газами. Газовой средой, в которой осуществляется плавка, могут быть воздух, продукты сгорания органического топлива, содержащие оксиды углерода, пары воды, оксиды серы, несгоревшие углеводороды, а также искусственно создаваемая атмосфера различных газов. Газовой фазой при плавке может быть вакуум-среда с очень малым содержанием газа, характеризуемая так называемым остаточным давлением. В любом случае в газовой среде над расплавом имеются пары самого металла, парциальное давление которых определяется температурой расплава. Таким образом, в обычных условиях выплавки невозможно получить расплавы (стали, чугуны, цветные сплавы), не содержащие газы (азот, водород, кислород). Это связано с тем: что, во-первых, любой

шихтовой материал, применяемый для плавки, содержит газы; во-вторых, по ходу обычной открытой плавки неизбежен контакт расплава с газовой фазой, содержащей N, H, O или водяные пары, и газы могут растворяться в жидком металле. Соприкосновение металлического расплава с газовой средой вызывает различные процессы, направленные в сторону достижения равновесия между соприкасающимися средами. Результатами этих процессов чаще всего являются загрязнение металлического расплава различными растворимыми и нерастворимыми примесями (включениями) или очищение расплава от загрязнений вследствие перехода их в газовую среду. Содержание газов в металлах принято выражать в процентах по массе, мольных процентах или долях, а также объемом газа в 1 см<sup>3</sup> приходящимся на 100 г металла. В последнем случае весь содержащийся в металле газ считают выделенным в свободном состоянии и приведенным к нормальным условиям (температура 20 °С и давление 1,01 · 10<sup>5</sup> Па). Если чистый жидкий металл достаточно долго соприкасается с газовой средой и развиваются процессы, направленные к достижению равновесия, то возможны следующие три типа изменения в составе и состоянии жидкой фазы:

1. Газовая фаза инертна по отношению к жидкому металлу, поэтому не происходит ни растворения газа в расплаве, ни образования каких-либо соединений. Сюда относится случай с достаточно малой растворимостью, не имеющей значения для процесса плавки металлов. Так, отсутствует взаимодействие между любым металлом и любым инертным газом нулевой группы периодической системы Д. И. Менделеева, а также в некоторых системах металл (Sn, Pb и др.) - водород, металл (Cu, Ag, Zn и др.) - азот.
2. Газы проявляют значительную растворимость в расплаве и определяют технологию плавки. В расплаве образуются насыщенный газами жидкий раствор и газовая фаза. По достижении в расплаве предельного содержания газа начнется образование химического соединения между газом и металлом. Для процесса плавки определяющим обстоятельством является именно образование раствора газа в жидком металле. Данный тип взаимодействия наблюдается во многих системах металл-водород.
3. Взаимодействие жидкого металла с газом выражается в образовании устойчивых химических соединений металл-газ из-за малой растворимости его в жидкой фазе, что наблюдается во многих системах металл - кислород. Тип взаимодействия жидкого металла с газом определяется природой металла и газа, температурой и

давлением газа над расплавом. Процесс взаимодействия жидкого металла с газами состоит из нескольких стадий. Поступление молекул газа к поверхности жидкого металла обеспечивается путем молекулярной диффузии и конвективного массопереноса в нем. При давлении 104 Па и более массоперенос осуществляется в основном конвекцией. Следующая стадия - переход молекул газа на поверхность расплава. Этот процесс называется адсорбцией. При высоких температурах основная роль принадлежит активированной адсорбции или хемосорбции, которая выражается не только в осаждении молекул газа на поверхность расплава, но и в частичной их диссоциации на атомы. Об этом свидетельствует большая величина теплоты хемосорбции, близкая к теплоте диссоциации двухатомных газов. Адсорбированные на поверхности расплава атомы газа либо диффундируют в глубь расплава, либо образуют химические соединения с металлом (пленка окислов). В последнем случае из-за нерастворимости образующегося окисла в расплаве нарастает слой окисла. Водород представляет обычно основную долю газов, обнаруживаемых в растворенном состоянии в металлах. Главный источник водорода - влага. Влага появляется в результате сгорания углеводородов природного газа и нефти, она адсорбирована на поверхности металлических материалов (шихты), подлежащих плавке, содержится в шлаках, флюсах, в свежей футеровке печей и ковшей. При соприкосновении металлического расплава с влагой происходит окисление металла и соответственно восстановление водорода. Водород находится в атомарном состоянии и поэтому легко переходит в расплав. Другим источником водорода при плавке являются углеводороды, содержащиеся в газообразном и жидком топливе. Олово, цинк, свинец, алюминий и кремний снижают растворимость водорода как в жидкой, так и твердой меди, а никель соответственно повышает ее в жидком и твердом сплавах. Наибольшая разность в величинах растворимости в твердом и жидком сплавах наблюдается для легирующих элементов Si, Al и Zn. Следовательно, в сплавах меди с данными элементами происходит выделение наибольшего количества газов при затвердевании, а значит, наиболее вероятно образование газовых раковин и пор в отливках. С кислородом подавляющее большинство металлов в жидком и твердом состояниях образует оксиды. Особенность поведения металлических жидкостей из цветных металлов и сплавов, содержащих растворенный кислород, состоит в том, что при их

охлаждении и кристаллизации этот газ никогда не выделяется из раствора в свободном виде, а переходит целиком либо в твердый раствор (например, в системе Ti-O), либо в твердые соединения - оксиды, появляющиеся в результате перитектического и эвтектического превращения (в системах Si-O и Ni-O). Это значит, что кислород в подобных металлах не вызывает появления газовой пористости. Взаимодействие жидких сплавов с кислородом происходит более сложно и приводит к различным результатам в зависимости от основы сплава и легирующих компонентов: - сплавы на основе легкоплавких металлов при любых легирующих компонентах ведут себя с кислородом подобно чистым металлам-основам, т. е. при соприкосновении таких расплавов с газовой средой, содержащей кислород, на поверхности расплава возникает пленка нерастворимых оксидов, состав которых определяется условием наименьшего значения  $\Delta G$  реакций образования свободных оксидов, их соединений или растворов между собой; - оставшаяся часть кислорода растворяется в расплаве; при избытке кислорода появляется свободный жидкий или твердый оксид менее благородного металла из числа содержащихся в сплаве; - при кристаллизации этих сплавов не выделяется кислород в свободном виде; кислород из жидкого раствора переходит в оксидную фазу по эвтектической реакции; - сплавы на основе меди и серебра с металлами, обладающими большим сродством к кислороду (Sn, Zn, Al, Si и др.), при взаимодействии с кислородом почти не способны растворять его; подобные расплавы очень быстро насыщаются кислородом и затем покрываются пленкой нерастворимых оксидов, которые состоят из соединений более активного по отношению к этому газу металла; в результате расплав загрязняется неметаллическими включениями оксидного характера. Для оценки взаимодействия жидких сплавов с кислородом необходимо учитывать изменение активности кислорода в растворе через параметры взаимодействия. Взаимодействие с молекулярным азотом. С ним жидкие металлы взаимодействуют с малой активностью, что обусловлено очень незначительной величиной константы диссоциации молекулярного азота. При наличии атомарного азота взаимодействие сильно ускоряется. Сплавы на основе легкоплавких металлов при обычных температурах плавки не реагируют с азотом и не растворяют его подобно чистым металлам-основам. Введение элементов, способных в большей мере поглощать азот, чем основа,

увеличивает растворимость азота в расплаве. В атмосфере плавильных печей могут находиться следующие сложные газы: пары воды (ОН), оксиды углерода (СО и СО), сернистый газ (SO), метан (СН<sub>4</sub>). Во всех случаях взаимодействия сложных газов с жидкими металлами происходит разрушение молекул газа с образованием свободных атомов и возникновением растворов одного или обоих этих элементов в жидком металле.

## Тема 2. Современные технологии при формообразовании

Современные автоматические процессы и оборудование для получения отливок в «сырых» песчаных формах. Способ уплотнения встряхиванием с полной амортизацией удара и одновременным прессованием из-за высокого уровня шума ( $> 95$  дБ) и значительной вибрации был распространен лишь в России, странах СНГ и в незначительных объемах в других странах. Недостатки способа привели к интенсивному развитию других технологий, в частности уплотнения газовым, а потом и воздушным импульсом. Так фирмы G.Fischer и BMD поставили в литейные цеха многие десятки АФЛ с использованием импульсного способа уплотнения. Параллельно с этим фирма «Кюнкель Вагнер» применила способ уплотнения с использованием вакуума при заполнении опоки смесью и прессовании, фирма HWS широко применяет способ уплотнения потоком воздуха, проходящим через смесь в опоке, и далее через венты в трудно уплотняемых местах на подмодельной плите и модели с последующей подпрессовкой.

Применение энергии сжатого воздуха в описанных способах для предварительного уплотнения смеси позволило получать качественные формы, существенно снизить уровень шума и сократить операцию уплотнения до 4–6 секунд.

Сокращение длительности уплотнения и совмещение в одном агрегате механизмов, осуществляющих предварительное и окончательное уплотнение прессованием, привело к сокращению длительности цикла работы формовочного автомата и позволило закрепить применение в АФЛ одного формовочного агрегата, последовательно изготавливающего верхнюю и нижнюю полуформы.

Перемещение форм на прямолинейных параллельных участках заливки и охлаждения по конвейерам на подопочных плитах и без них или на плитах-тележках по рельсовым путям с применением гидропривода обеспечивает плавность хода форм на конвейере. Кроме того, такой транспорт делает линии более компактными и позволяет на параллельных участках охлаждения организовать охлаждение форм с различной заданной длительностью.

Возникли предпосылки к созданию линий, которые должны эффективно работать в условиях непрерывного расширения номенклатуры отливок, уменьшения размеров их партий и сокращения сроков поставки.



Получают развитие направления по расширению технологических возможностей АФЛ и приближению их к созданию гибких автоматизированных производств отливок.

Совершенствуются способы уплотнения смеси с использованием в качестве предварительного уплотнения энергии сжатого воздуха. Практически все основные производители АФЛ, несмотря на значительный расход воздуха (до 13 объемов опоки), используют в формовочных автоматах для предварительного уплотнения различные варианты продувки сжатым воздухом смеси в опоке через венты в подмодельной плите (HWS -Seiatsu, G.Fischer, Disa -Impact Multi Sistem, KW- Airopress plus) с последующим прессованием многоплунжерной или эластичной плитой.

Этот способ уплотнения наиболее полно удовлетворяет требованиям по точности отливок и экологическим нормам.

Фирма HWS стала выпускать формовочные автоматы и успешно заменять формовочные агрегаты на действующих линиях вместо применявшихся формовочных автоматов с уплотнением встряхиванием с прессованием, пескострельно-прессовых, вакуумно-прессовых и импульсных без подпрессовки. Такой подход позволяет производителям отливок с малыми затратами решить проблемы расширения технологических возможностей линий и их экологичности.

В последнее время решена проблема автоматической (в цикле работы формовочного автомата) замены модельных комплектов, что обеспечило возможность изготовления на автомате двух, трех и более различных форм с повторением такого цикла до тех пор, пока не отпадет необходимость в производстве одной или всех форм.

В европейских странах отказались от горизонтально замкнутых литейных конвейеров, резко уменьшилось число линий с двухстадийным охлаждением (охлаждение в форме, а затем в коме). Увеличилось количество линий с компактными многоэтажными системами охлаждения форм и линий с регулируемым охлаждением.

Фирмы-производители АФЛ стали более внимательны к требованиям и возможностям заказчиков. Линии поставляются любой компоновки, комплектации и уровня автоматизации, с перспективой наращивания до полной АФЛ.

Расширяется производство на АФЛ отливок из А1-сплавов. Этому способствуют успехи в получении на АФЛ более точных форм и, особенно, более высокая производительность линий (в 10 и более

раз), по сравнению с производством отливок в металлических формах. Для более плавного заполнения формы А1-сплавом фирма HWS предлагает новые способы заполнения форм снизу или сбоку. Проблема отсечки залитого металла в форме от металла в напорной заливочной установке решается путем передавливания питателя смесью с помощью специального плунжера. Эта операция необходима для отхода залитой формы с позиции заливки в цикле работы линии и поступления на эту позицию очередной не залитой формы. Новый в практике создания АФЛ способ заливки требует только дополнительного устройства (для поворота формы на 90 град, вдоль ее оси на участке заливки) и новой заливочной установки. Подобными разработками занимаются такие фирмы G.Fischer Disa и Loramendi. Одно из ведущих направлений в литейном производстве занимает процесс и оборудование формообразования ДИСАМАТИК

Многие литейные предприятия не могут приобрести сегодня дорогостоящие современные АФЛ. Но они могут приобрести формовочные автоматы разного уровня комплектации и автоматизации и, максимально сохраняя имеющееся оборудование, по мере накопления средств, расширить состав линии и повысить уровень ее автоматизации. Хороших результатов в применении АФЛ можно достичь, если вся инфраструктура цеха соответствует высокому уровню АФЛ.

В настоящее время основную долю отливок (по массе) производят литьем в разовые формы из сырых песчано-глинистых смесей. При выборе способа уплотнения необходимо иметь в виду выполнение основной задачи – изготовить форму требуемого качества с минимальными затратами энергии и времени.

Под качеством формы понимается комплекс ее свойств, обеспечивающий заданную массовую и размерную точность и шероховатость поверхности отливки.

Качество формы связано с плотностью смеси. Изготовленная форма будет качественной, если достигнуто технологически необходимое распределение плотности смеси по ее объему. Технологически необходимое распределение плотности смеси по объему формы можно получить, обеспечив равномерную плотность смеси в горизонтальных сечениях формы (в узких и широких зазорах между стенками отливок и опоки). По высоте формы плотность смеси должна уменьшаться к контрладу.

Исследования особенностей поведения смеси при уплотнении позволяют сформулировать общие требования к способам изготовления форм, выполнение которых обеспечит получение форм хорошего качества.

Первое требование – это независимость действия внешних нагрузок, приложенных к различным областям формы, друг от друга. При прессовании плоской плитой основная часть внешней нагрузки воспринимается смесью в надмодельной области формы. При этом смесь в околomodельной области формы оказывается недоуплотненной. Применение профильной плиты, эластичной диафрагмы и профильной засыпки смеси позволяют распространить действие полной внешней нагрузки на все области формы.

Основной недостаток уплотнения смеси прессованием – низкая плотность смеси в узких зазорах (карманах) между стенками опоки и моделей, а также избыточная плотность смеси на контрладе формы. Отметим, что рассмотренные способы прессования относятся к статическим способам, т.е. скорость приложения внешней нагрузки очень мала и на процесс уплотнения смеси влияния не оказывает.

Второе требование – динамическое приложение внешней нагрузки. При скоростном нагружении в смеси резко снижается коэффициент бокового давления и, как следствие, уменьшаются силы внешнего трения смеси о стенки опоки и моделей, появляется возможность получать высокую плотность смеси в узких зазорах между стенками опоки и моделей.

Один из способов, удовлетворяющий этим двум требованиям – уплотнение смеси встряхиванием. При встряхивании смесь уплотняется как в узких, так и в широких карманах формы, наибольшая ее плотность достигается на ладе формы и уменьшается к контрладу.

Недостатки: местная рыхлота смеси около верхних углов моделей, десятки ударов встряхивающего стола на одну форму, превышение санитарных норм по шуму.

Третье требование – простота и надежность оборудования, соблюдение санитарных норм.

В 70-е гг. за рубежом возникла и сразу заняла лидирующее положение воздушно-импульсная формовка. Благодаря специальной конструкции клапана импульсной головки, однократному его действию в процессе изготовления формы и низкому шуму этот способ вытеснил (за рубежом) применявшееся встряхивание. В

последнее время однократный воздушный импульс используется меньше из-за главного недостатка – местной рыхлоты над верхними углами моделей. Дальнейшие исследования процесса показали, что качество форм можно обеспечить, управляя как величиной, так и очередностью приложения внешней нагрузки на разные области формы.

Четвертое требование – Управление действием внешней нагрузки на различные области формы. Впервые это требование было реализовано при изготовлении форм прессованием многоплунжерной головкой. При одновременном воздействии плунжеров на смесь увеличение давления прессования над плунжерами, прессующими смесь в около модельных областях формы, обеспечивает практически равномерное распределение плотности смеси в форме. Давление прессования должно быть  $\sim 2\text{--}2,5$  МПа. Эти рекомендации получены для статического прессования и, хотя качество форм по сравнению с другими способами прессования получается выше, разнородность плотности смеси в узких и широких карманах все же сохраняется.

Выполнить первое, второе и четвертое требования удалось при способе изготовления форм «воздушным импульсом – плюс» (фирма Г.Фишер), вариоимпульс (фирма ВМД). Особенность уплотнения смеси этими способами заключается в том, что сначала воздушный поток направляется в узкие карманы, что позволяет получать высокую плотность смеси в этих местах формы, а затем уже внешняя нагрузка прилагается ко всем областям формы.

Всем этим требованиям отвечал и предложенный фирмой ВМД способ DINAPLUSE – смесь динамически уплотняется многоплунжерной головкой, причем под каждый плунжер подводится свое давление сжатого воздуха и обеспечивается последовательность прессования плунжерами, обусловленная конфигурацией моделей.

Однако, современные клапаны импульсных головок довольно сложны, не говоря уже о способе DINAPLUSE. Дальнейшее развитие этого способа уплотнения сдерживается из-за усложнения конструкции формовочных машин.

В исследованиях процесса уплотнения форм сжатым воздухом (ф. «Г. Фишер») установлено, что основным технологическим параметром, который обеспечивает различные механизмы уплотнения смеси при уплотнении продувкой и импульсном уплотнении, является скорость подъема давления над смесью. Максимальная скорость подъема давления для продувки составляет  $1,5\text{--}4,0$  МПа/с.

Двухступенчатое уплотнение смеси (предварительное воздушным потоком и последующее прессованием) было успешно применено более чем на 350 формовочных машинах и линиях в Европе и сейчас уже является стандартом при изготовлении форм.

В последних конструкциях формовочных машин ф. "Г.Фишер Диса" в дополнение к импульсному клапану применяет специальный клапан для медленного подъема давления над формой. Одновременно фирма стала выпускать модели машин, не имеющих традиционного импульсного клапана, уплотнение на которых производится продувкой с последующим прессованием.

Многие другие разработанные за последние годы методы уплотнения утратили свое значение или же во многом были приближены к уплотнению воздушным потоком с последующим прессованием (методу Seiatsu - СЕЙАТСУ), авторство на который принадлежит фирме HWS. Фирма HWS продолжает работу над дальнейшим совершенствованием метода уплотнения СЕЙАТСУ.

Технология и оборудование уплотнения воздушным потоком с прессованием, способ Сейатсу.

Уплотнение формовочной смеси по способу СЕЙАТСУ (уплотнение воздушным потоком с прессованием) происходит следующим образом:

Пространство модельной оснастки, определяемое подмодельной плитой с моделью, опокой и наполнительной рамой, заполняется формовочной смесью при помощи жалюзийного затвора бункера-дозатора.

Затем бункер-дозатор передвигается под ленточный питатель запасного бункера смеси и одновременно прессовая головка занимает положение над наполнительной рамой формы. Стол машины поднимается и прижимает держатель подмодельной плиты с опокой и наполнительной рамой к прессовой головке таким образом, чтобы пространство формы было герметично. Затем кратковременно открывается клапан воздушного потока. Воздушный поток проходит формовочную смесь от контрлада в сторону модели и уходит через венты в подмодельной плите.

Дополнительное прессование сверху плоской прессовой плитой, мембраной или многоплунжерной головкой окончательно уплотняет форму.

Во время процесса уплотнения снова заполняется бункер-дозатор смесью. Вытяжка модели из формы происходит путем

опускания стола машины. Одновременно передвигаются бункер-дозатор смеси и прессовая головка в исходное положение.

При прохождении формовочной смеси в сторону модели воздушный поток оказывает на каждую частицу смеси усилие, направленное вниз. Частицы песка протекают вместе с потоком воздуха в нижние части формы и болваны. В направлении потока (вниз) с каждым слоем смеси возрастает плотность смеси. Поэтому вблизи подмодельной плиты достигается наибольшее уплотнение.

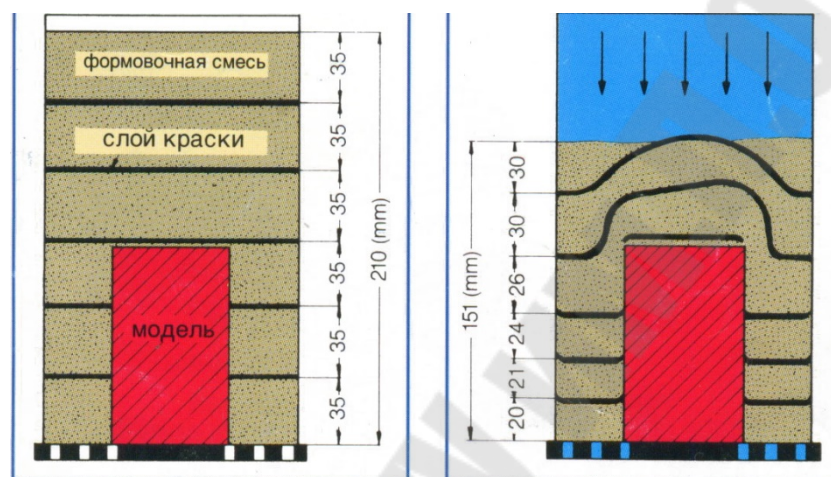


Рис. 1. Процесс уплотнения методом СЕЙАТСУ.

Преимущества способа СЕЙАТСУ.

1) равномерно высокая твердость формы является предпосылкой для изготовления отливок высокой размерной точности. На диаграмме сравнения показателей твердости формы при уплотнении встряхиванием с подпрессовкой и способом СЕЙАТСУ наглядно видна более равномерная твердость формы после уплотнения по способу СЕЙАТСУ;

2) уменьшение формовочного уклона до 0,5, что позволяет снизить затраты на механическую обработку отливок;

3) уменьшается количество применяемых стержней, так как возможна формовка сложных контуров моделей и болванов вследствие равномерной твердости формы;

4) лучше используется плоскость разъема для размещения большего количества отливок, так как допускаются меньшие расстояния между моделями и до стенок опок;

5) уменьшаются затраты на очистку и окончательную обработку отливок, так как отливки практически не имеют пригара и литейных дефектов на поверхности;

б) Снижается уровень шума на рабочем месте. Отсутствует динамическое воздействие на фундамент.

Способ уплотнения формовочной смеси «Сейатсу» разработан в Японии на фирме «Sinto» в 60-х годах. К настоящему времени доработан и успешно используется ф. HWS, Германия. Обеспечивает высокое качество формы. Песок не прилипает к модели при ее удалении. Поэтому даже при выемке очень сложных моделей из формы проблем не возникает. Накопление микрочастичек песка на поверхности модели обеспечивает получение гладкой поверхности отливки. Газопроницаемость формы выше, чем при других способах уплотнения. Как при низких, так и при высоких степенях сложности форм обеспечивает равномерное уплотнение формы и высокую прочность формы, что особенно важно при изготовлении отливок из высокопрочного чугуна (ЧШГ).

Компания HWS представляет на рынке литейного оборудования технологию «Сейатсу» широкой гаммой машин и автоматов, что позволяет применять их практически для любой номенклатуры мелких и средних отливок. При этом параметры производительности оборудования, различная степень автоматизации и приспособленность формовочных машин к различному опочному парку делает это оборудование удобным для модернизации и реконструкции практически любых формовочных линий и систем.

Производительность формовочной машины в значительной степени зависит от уровня механизации всей линии. Уровень автоматизации определяется техническими данными производства, а также планировочными возможностями.

Автоматическая формовочная установка предназначена для сопряжения с имеющимся в литейном цехе напольным пластинчатым конвейером.

Залитая и охлажденная форма снимается с конвейера специальным устройством, на котором она выбивается, распаривается и затем верхняя, и нижняя полуформы подаются последовательно на формовочную линию для изготовления новой комплектной и готовой к заливке формы, которая снова ставится на пластинчатый конвейер.

Новые решения в формовочном оборудовании HWS.

За последние два года фирмой HWS разработаны новые инженеринговые решения, к которым можно отнести систему управления формовочной линией ALS WEB, имеющую несколько уровней. Так, в специальном модуле 2-го уровня системы управления

обслуживающий персонал маркирует бракованные формы (поврежденные или со сломанным стержнем). Затем этот сигнал передается на заливочную систему, и эта форма не заливается металлом. Кроме того, система управления участком формовки позволяет точно найти формы, залитые из ковша некачественным металлом, даже после заливки. Для этого оператор линий маркирует в системе управления эти формы как бракованные, и полученные в этих формах отливки выводятся из всего потока литой продукции.

В настоящее время почти все высокопроизводительные формовочные линии имеют несколько возможностей для удаления отливок из потока. Примером могут служить линии HWS на заводе американской фирмы GREDE (Мексика) и канадской фирмы WESCAST (Венгрия), где бракованные и незалитые формы отводятся в сторону. Количество бракованных и залитых некачественным металлом форм фиксируется системой управления ALS, которая автоматически добавляет необходимое до требуемого объема производства отливок количество форм. Кроме того, возможен ежедневный или ежемесячный учет производства по отдельным отливкам.

Другая важная система управления - система сбора данных об отливке PDC, обладает сведениями о качестве каждой изготавливаемой отливки, которой присваивается индивидуальный номер. Такие системы PDC функционируют на формовочных линиях HWS, установленных на заводах Daimler Chrysler - Mercedes в Штутгарте и на заводе Profferro в Бельгии.

В системе PDC собираются все технологические параметры, влияющие на качество отливок, такие, как характеристики:

- металла (номер ковша, результаты лабораторных испытаний, количество и марка модификатора, введенного в ковш);
- заливки (номер ковша, количество модификаторов, введенных в форму, температура и продолжительность заливки, масса заливаемого металла);
- формовочной смеси (номер замеса, состав и свойства смеси);
- стержней (номер стержневого-ящика, состав стержневой смеси, технология изготовления стержней);
- процесса формовки (масса смеси в форме, технология уплотнения формы, номер подмодельной плиты).

Все эти данные собираются в индивидуальный паспорт по каждой отливке за весь цикл ее изготовления.



Особое внимание в эти годы уделяли достижению высокой гибкости АФЛ для производства широкой номенклатуры отливок. Среди инжиниринговых решений по этому вопросу следует отметить возможность комбинирования разных по высоте и габаритам опок в одной формовочной линии с одной формовочной машиной. Так, например, комбинирую подмодельную плиту (1/2 или 1/4 часть) из разных плит, используя специальные вставки.

Интересным решением является автоматическая сортировка массивных и легких отливок или отливок с толстыми и тонкими ребрами, а также отливок, изготовленных из разных сплавов (чугуна или А1-сплавов) по разным участкам финишной обработки, для чего на некоторых современных АФЛ установлены две выбивные решетки. Такое решение реализовано на АФЛ, установленной на заводе Daimler Chrysler в Германии.

Условия современного литейного производства требуют различных по габаритам опок и различных комбинаций по высоте опок, а также возможности производить отливки как из чугуна, так и из А1-сплавов. Фирма HWS реализовала все это на одной формовочной линии и только с одной формовочной машиной. При этом разработаны следующие варианты:

1. Изготовление, при необходимости, незначительного количества верхних полуформ в более высокой верхней опоке (на 50 или 75 мм), если часть отливок выше остальных, так как нецелесообразно всю партию отливок изготавливать в одинаковых высоких опоках.

2. Можно одновременно использовать опоки разной высоты на одной формовочной линии. Например, на фирме EMG на одной АФЛ применяют опоки высотой 170/170 и 300/300 мм. на этой линии одновременно производят отливки из ЧШГ и А1.

3. Использование опок верха и низа разной высоты и их взаимная заменяемость. Такое решение использовано на новой линии HWS, запущенной в 2000 г. на заводе Fritz Winter, где впервые в мире реализована возможность взаимной замены опок верха и низа, высотой 220 и 400 мм. Преимущества такого решения следующие. При сочетании опок верха высотой 220 мм и низа высотой 400 мм можно изготавливать отливки тормозных барабанов «висячими», и они гораздо меньше склонны к пористости. Сочетание опок верха высотой 400 мм и низа 220 мм целесообразно для производства отливок вентилируемых дисков для легковых автомобилей при

двухэтажном расположении в форме. Такая формовочная машина для производства «отливки в отливке» и крупных вентилируемых дисков грузовых автомобилей без наружного стержня работает уже 5 лет на фирме Busch.

4. Использование двух типов опок разных габаритов на одной формовочной машине. Так, на фирме Proferto введен в действие участок формовки, где на одной формовочной машине изготавливают разные по габаритам формы. Например, при использовании опок размерами 2200 × 1420 × 350/ 350 мм производительность линии составляет 60 форм/ч, а с опоками размерами 1420 × 910 × 250/250 мм производительность линии уже 160 форм/ч. Использование такой АФЛ позволяет значительно снизить капиталовложения, так как вместо ввода двух линий достаточно использовать только одну АФЛ.

Среди новых инжиниринговых решений особо следует отметить гибкость процесса заливки. Заливку можно осуществлять традиционно из ковша или под низким давлением.

В последнее время фирмой HWS разработана новая технология заливки песчаных форм – технология Injectafill. Цель этой разработки – обеспечение гибкости процесса заливки для получения тонкостенных сложно профильных отливок высокой точности и более низкой себестоимости, чем при производстве в кокиль или литьем под давлением.

В настоящее время на фирме HWS для фирмы Vachert (Германия), являющейся постоянным поставщиком высококачественных АІ-отливок на автомобильные концерны, изготавливается первая АФЛ с возможностью выбора способа заливки. Фирмой HWS в разных литейных цехах проведены тесты, подтверждающие высокую эффективность производства с использованием гибкой заливки отливок с очень тонкими стенками, например отливок коллекторных труб.

DISAMATIC – это эффективный процесс формообразования. Фирма «ДИСА» («Данск Индустри Синдикат А/О») начала свою деятельность в 1900 г. Целью основания фирмы явилось изготовление автоматического и полуавтоматического стрелкового оружия, но в настоящее время продукция фирмы – это в основном литейное оборудование.

В последнее десятилетие почти во всех промышленных областях отливки высокой точности постепенно вытесняют детали,

изготовленные механическими методами. И тенденция эта неуклонно растет.

Введение автоматических литейных линий ДИСАМАТИК в 60 - 70-х годах произвело революцию в литейной промышленности. Современные литейные заводы в мире освоили эти линии сразу при их появлении.

Автоматические литейные линии ДИСАМАТИК могут изготавливать отливки с минимальными допусками, которых нельзя достичь при других методах производства отливок в сырых песчаных формах. Это подтверждается двумя факторами:

Простота принципа ДИСАМАТИК исключает возможные смещения полуформ при их перемещении. Формы все время остаются в одной плоскости, что обеспечивает сохранение каждой полости в нетронутном состоянии вплоть до момента выемки отливки из формы.

Машины ДИСАМАТИК сконструированы и изготовлены с высокой точностью и обладают большой устойчивостью. Все подвижные детали и узлы точно управляются, имеют высокую степень надежности и изготавливаются из специального износостойкого материала.

ДИСАМАТИК является полностью автоматизированной формовочной машиной для изготовления безопасных форм с производительностью 360 и более сырых песчаных форм в час. Качество его работы соответствует качеству работы прецизионного станка. Формовочная машина ДИСАМАТИК не только эффективно использует площадь и рабочую силу, но и позволяет изготавливать отливки высокого качества. ДИСАМАТИК удовлетворяет самым строгим требованиям безопасности, здравоохранения и охраны окружающей среды.

Фирма ДИСА изготавливает вспомогательное машинное оборудование, в частности, системы конвейеров для форм, охлаждающие барабаны, стержневые формовочные машины и стержнеукладчики для установки стержней в песчаные формы.

ДИСАМАТИК типа 2011 явился первым образцом ДИСАМАТИК, который был установлен в датском литейном цехе в феврале 1964 г. Размер форм – 400 × 500 мм. Представлял собой механически, гидравлически-пневматически управляемый блок. Длина участка заливки составила 6 м, а за ним следовал свободно движущийся, охлаждающий ленточный конвейер из резины.

ДИСАМАТИК тип 2013 является самым распространенным типом на сегодня работающих формовочных автоматов. Четвертое поколение этого автомата изготавливалось под названием 2013 Mk 4. Размеры форм для всех типов 2013 - 480 × 600 мм, толщина форм - от 120 мм до 330 мм.

ДИСАМАТИК типа 2013 Mk 4 имеет улучшенную форму, продленный участок охлаждения отливок, упрощенное обслуживание, уход и регулировки. Автоматический ленточный конвейер (АМС) удлинения участков заливки и охлаждения до транспортирования форм к охлаждающему конвейеру - АМС 2042 Mk 4 управляется приводом от отдельной гидравлической силовой станции.

Главные улучшения ДИСАМАТИК 2013 Mk 4:

- новая система пневматической очистки;
- новая система вентиляции формовочных камер;
- новая система очистной жидкости;
- новый стопор плиты противодействия;
- новое защитное ограждение;
- новая опора плиты противодействия;
- новые направляющие модельных плит;
- новая щель для ввода песка

ДИСАМАТИК 2013 типа Mk 4 удовлетворяет более строгим, современным нормам безопасности при более высокой производительности.

ДИСАМАТИК типа 2032 появился в 1972 г., он привлек большое внимание из-за системы РМС, позволяющей транспортирование форм без разрушения их и без промежутков между формами. РМС - прецизионный конвейер для форм.

Размер форм – 600 × 775 мм, толщина формы от 150 до 400 мм.

ДИСАМАТИК типа 2070 впервые изготовлен в 1977 году. Размер форм – 700 × 950 мм, толщина формы может быть изменена в пределах 200–560 мм. Прост в работе и уходе. Имеет электронное устройство для отыскания неисправностей и высокую степень безопасности. Обладает саморегулируемыми эксплуатационными параметрами. Максимальная производительность достигает 275 форм/ч. Такая производительность достигается при изготовлении форм без литейных стержней при толщине формы 200 мм и длине ряда форм до 30 метров.

Формы изготавливаются в формовочной камере, закрывающейся двумя модельными пластинами, соединенными с отдельными гидравлическими поршнями.

Одно из многих преимуществ ДИСАМАТИК 2070 – возможность производить сжатие обеих сторон формы одновременно. То есть обе прессплиты подвижны в пределах формовочной камеры, что означает следующее. Формовочная камера может фактически перемещаться по отношению к щели для ввода формовочной смеси путем одновременного перемещения обеих прессплит. Таким образом, промежуток между моделями можно сцентрировать под щелью для ввода формовочной смеси. Центровка производится автоматически по высоте модели и модельной плиты, которые вводятся оператором в контрольную систему машины.

В комплексе 2070 предусмотрен автоматический стержнеукладчик 2073, который используется при производстве сложных отливок с использованием литейных стержней. Максимальная производительность – 250 форм/час. Максимально допустимая высота стержней – 490 мм. Часть стержня, выходящая за пределы формы, может достигать 250 мм независимо от толщины формы.

Поставленные в ряд формы продвигаются вперед с помощью машины и конвейера на расстояние, точно равное шагу формы. Заливка может быть произведена на расстоянии около 4 метров от машины полуавтоматическим или полностью автоматическим системами заливки. Такие системы находят все большее применение в современных литейных цехах и, следовательно, увеличивают преимущества ДИСАМАТИК.

Система контролируется с помощью центрального блока управления.

К прецизионному конвейеру для форм можно присоединить специальный блок – машину для извлечения отливок. Это особенно выгодно при изготовлении тяжелых отливок с использованием литейных стержней. Блок предотвращает возвращение выбиваемой стержневой смеси в систему регенерации отработанной смеси.

Охлаждающий барабан DISACOOЛ заменяет традиционные системы выбивки и решает связанные с ними проблемы в области экономики и охраны окружающей среды. Изготавливается в трех размерах, соответствующих ДИСАМАТИК 2013, 2032 и 2070. Фирма

ДИСА также поставляет автоматический блок для заливки DISA-INDUCAL.

Метод ДИСАМАТИК предъявляет более высокие требования к формовочной смеси. Для того, чтобы максимально реализовать преимущества метода с применением высокого давления, что дает высокую точность размеров и ровную поверхность отливок, рекомендуется пользоваться только качественной формовочной смесью.

При разработке и создании новой промышленной продукции особое значение имеет скорость прохождения этапов НИОКР, которая в свою очередь существенно зависит от технологических возможностей опытного производства. В частности это касается изготовления литейных деталей, которые часто являются самой трудоемкой и дорогостоящей частью общего проекта. При создании новой продукции, особенно на этапе ОКР в опытном производстве, для которого характерны варианты исследования, необходимость частых изменений конструкции и, как следствие, постоянной коррекции технологической оснастки для изготовления опытных образцов, проблема быстрого изготовления литейных деталей становится ключевой. В опытном производстве преимущественными остаются традиционные методы изготовления литейной оснастки (в основном деревянные модели) вручную или с использованием механообрабатывающего оборудования, реже ЧПУ. Это связано с тем, что на этапе ОКР в условиях неопределенности результата, когда конструкция изделия еще не отработана, не утверждена, для изготовления образцов не целесообразно создавать «нормальную» технологическую оснастку под серийное производство. В этих условиях весьма дорогостоящая продукция – литейная оснастка, оказывается, по сути разовой, которая в дальнейшей работе над изделием не используется в связи с естественными и существенными изменениями конструкции изделия в ходе ОКР. Поэтому каждая итерация, каждое приближение конструкции детали к окончательной версии требует зачастую и новой технологической оснастки, поскольку переделка старой оказывается чрезмерно трудоемкой или вообще не возможной. И в этой связи традиционные методы оказываются не только дороги в плане материальных потерь, но и чрезвычайно затратны по времени.

Переход на цифровое описание изделий – CAD, и появившиеся вслед за CAD (вследствие CAD) аддитивные технологии произвели

настоящую революцию в литейном деле, что особенно рельефно проявилось именно в высокотехнологичных отраслях – авиационной и аэрокосмической области, атомной индустрии, медицине и приборостроении, в отраслях, где характерным является мало серийное, зачастую штучное (в месяц, год) производство. Именно здесь уход от традиционных технологий, применение новых методов получения литейных синтез-форм и синтез-моделей за счет технологий послойного синтеза дали возможность радикально сократить время на создание новой продукции. Например, характерная для автомобильного двигателестроения деталь – блок цилиндров. Для изготовления первого опытного образца традиционными методами требуется не менее шести месяцев, причем основные временные затраты приходятся на создание модельной оснастки для литья «в землю».

Использование для этой цели технологии Quick-Cast (выращивание литейной модели из фотополимера на SLA-машине с последующим литьем по выжигаемой модели) сокращает срок получения первой отливки с полугода до двух недель.

### **Тема 3. Современные технологии при подготовке производства**

Аддитивные технологии (АТ) начали интенсивно развиваться со времени получения первых трехмерных изображений изделий на дисплеях компьютеров. Начало положила стереолитография, затем довольно многочисленные новые принципы стали называть технологиями быстрого прототипирования (Rapid Prototyping) и, наконец, укоренилось название «Аддитивные технологии».

Интенсивность их развития не имеет аналогов. Эти технологии принципиально изменили процессы проектирования и конструирования изделий, превратив их в процессы непрерывного создания изделий. Конечно, еще много не решенных задач в области производительности аддитивных процессов, в области точности производимых изделий, в области материалов, используемых для изготовления изделий, но все эти проблемы решаемые. А главное в том, что уже современное проектирование и производство изделий немыслимо без аддитивных технологий и на Западе, например, 3D-принтеры стали такими же привычными и распространенными, как персональные компьютеры.

Уже сейчас с помощью стандартных 3D-принтеров получают ткани, обувь, продукты питания и даже выращивают живые человеческие органы.

Во многих отраслях, например, в космической отрасли, альтернативы аддитивным технологиям не видно уже сегодня.

В недалеком прошлом, лет 10–15 назад, аддитивные технологии использовались преимущественно в традиционно технологически продвинутых отраслях – автомобильной, авиационной и аэрокосмической промышленности, а также в приборостроении и медицине, где тандем «время – деньги» всегда имел особое значение.

Поэтому все больше направлений промышленности активно осваивают АТ-технологии. Все чаще их используют научно-исследовательские организации, архитектурные и конструкторские бюро, дизайн-студии и просто частные лица для творчества или в качестве хобби. Во многих колледжах и университетах аддитивные машины, или, как их часто называют, 3D-принтеры являются неотъемлемой частью учебного процесса для профессионального обучения инженерным специальностям.



Существует множество технологий, которые можно назвать аддитивными, но объединяет их одно: построение модели происходит путем добавления материала (от англ. add – добавлять) в отличие от традиционных технологий, где создание детали происходит путем удаления «лишнего» материала.

Классической и наиболее точной технологией является SLA-технология (от Stereolithography Apparatus), или стереолитография, – метод поэтапного послойного отверждения жидкого фотополимера лазером. Существует много видов фотополимерных композиций, поэтому спектр применения прототипов, полученных по SLA-технологии, очень широк: макеты и масштабные модели для аэро- и гидродинамических испытаний, литейные и мастер-модели, дизайн-модели и прототипы, функциональные модели и дизайнерские компоненты повышенной точности с высоким уровнем детализации.

Наиболее активно развивается сейчас SLS-технология – метод послойного селективного лазерного плавления металлических порошков, который дает возможность безотходного изготовления деталей или заготовок непосредственно по данным из 3D CAD-систем практически любой сложности из широкого спектра металлов. Принцип работы этой технологии заключается в выборочном плавлении тонкого слоя металлического порошка лучом лазера в соответствии с геометрией сечения детали, соответствующей каждому слою порошка. Селективное лазерное спекание изначально появилось, как усовершенствованный метод отверждения жидкого фотополимера. Здесь строительным (модельным) материалом являются сыпучие, порошкообразные материалы, а лазер является не источником света, как в SLA-машинах, а источником тепла, посредством которого производится сплавление частичек порошка. В качестве модельных материалов используется большое количество как полимерных, так и металлических порошков. Современные SLS-принтеры способны работать с керамической глиной, металлическим порошком, цементом и сложными полимерами.

Самыми дешевыми по-прежнему остаются FDM-принтеры – устройства, создающие трехмерные объекты путем послойного наплавления филамента (технология «струйной печати»). Эта технология предполагает нанесение модельного материала или связующего состава с помощью струйных головок. Наиболее распространенными принтерами данного типа остаются аппараты, печатающие расплавленной пластиковой нитью. Они могут

оснащаться одной или несколькими печатными головками, внутри которых находится нагревательный элемент. Большинство аддитивных принтеров, печатающих пластиковой нитью, способны создавать только одноцветные фигуры, однако в последнее время на рынке трехмерной печати появились машины, использующие одновременно несколько видов филамента. Данное новшество позволяет создать цветные объекты.

Они позволяют «выращивать» непосредственно литейные формы, т. е. «негатив» детали, и исключить стадии изготовления формовочной оснастки – мастер-модели 2 и литейной модели 3. Компания ExOne (и ее дочернее предприятие ProMetal GmbH) выпускает машины типа S-Max, которые позиционируются не как «прототипирующие машины» – работающие для получения образца модели, а как вполне «рядовое» технологическое промышленное оборудование, устанавливаемое в общей технологической цепи производства не только опытной, но и серийной продукции.

Практически все автомобильные компании мира обзавелись такими машинами. С их помощью стало возможным не в разы, а на порядок сократить время прохождения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по критически важным для автостроителей позициям – литейным деталям: блоки и головки цилиндров двигателей, мосты и коробки передач, деталям, на изготовление которых в традиционном опытном производстве тратились месяцы, а с учетом экспериментальной доводки и подготовки производства – многие месяцы. Теперь конструктор может увидеть свой новый двигатель на испытательном стенде не через полгода, а через две недели после завершения технического проекта.

Несмотря на то, что рынок филаментов регулярно пополняется новыми материалами, пластик и его различные сплавы до сих пор занимают лидирующие позиции. Дело не только в том, что львиную долю оборудования для трехмерной печати составляют FDM-принтеры. Производство и последующее использование «полимерных» чернил обходится в разы дешевле, нежели использование металлоглины или фотополимеров.

АБС-пластик (акрилонитрилбутадиенстирол, химическая формула  $(C_8H_8)_x \cdot (C_4H_6)_y \cdot (C_3H_3N)_z$ ) – ударопрочная техническая термо-пластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом. Пропорции могут варьироваться в

следующих пределах: 15–35 % акрилонитрила, 5–30 % бутадиена и 40–60 % стирола.

Производство одного килограмма АБС требует эквивалента примерно 2 кг нефти в виде материалов и энергии. Также он может быть повторно переработан.

Некоторые виды АБС могут разрушаться под воздействием солнечного света. Это стало причиной одного из самых обширных и дорогостоящих отзывов автомобилей в истории США. Свойства:

- непрозрачный (хотя есть и прозрачная модификация – МABS) материал желтоватого оттенка. Окрашивается в различные цвета;

- нетоксичность в нормальных условиях;

- долговечность в отсутствие прямых солнечных лучей и ультрафиолета;

- стойкость к щелочам и моющим средствам;

- влагостойкость;

- маслостойкость;

- кислотостойкость;

- теплостойкость 103 °С (до 113 °С у модифицированных марок);

- широкий диапазон эксплуатационных температур (от –40 °С до +90 °С);

- растворяется в сложных эфирах, кетонах, 1,2-дихлорэтано, ацетоне;

- плотность 1.02-1.06 г/см<sup>3</sup>.

АБС-пластик используется как один из самых практичных материалов для 3D-печати.

Используется для изготовления:

- крупных деталей автомобилей (приборных щитков, элементов ручного управления, радиаторной решётки);

- корпусов крупной бытовой техники, радио- и телеаппаратуры, деталей электроосветительных и электронных приборов, пылесосов, кофеварок, пультов управления, телефонов, факсовых аппаратов, компьютеров, мониторов, принтеров, калькуляторов, другой бытовой и оргтехники;

- корпусов промышленных аккумуляторов;

- спортивного инвентаря, деталей оружия;

- мебели;

- изделий сантехники;

- выключателей, переключателей;

- канцелярских изделий;
- музыкальных инструментов;
- настольных принадлежностей;
- игрушек, детских конструкторов;
- чемоданов, контейнеров;
- деталей медицинского оборудования, медицинских принадлежностей (гамма-стерилизация);
- смарт-карт;
- как добавка, повышающая теплостойкость и/или улучшающая перерабатываемость композиций на основе ПВХ, ударопрочность полистирола, снижающая цену поликарбонатов.

ABS стал первым материалом, из которого начали изготавливать пластиковую нить для домашних настольных аддитивных принтеров. К его недостаткам принято причислять стойкий пластмассовый запах, выделяющийся во время печати. С другой стороны, модели, напечатанные из ABS, отличаются прочностью и износостойкостью. Готовые детали часто получают немного смазанными, из-за чего нуждаются в корректировочных и восстановительных работах. Шлифовка и обработка наждачной бумагой сводят данную проблему на нет.

Материал способен выдержать высокие температуры, поэтому рекомендуется для применения в процессе изготовления долговечных конструкций и комплектующих, регулярно подвергающихся физическому износу.

Полилактид (ПЛА) – биоразлагаемый, биосовместимый, термопластичный, алифатический полиэфир, мономером которого является молочная кислота. Сырьем для производства служат ежегодно возобновляемые ресурсы, такие как кукуруза и сахарный тростник. Используется для производства изделий с коротким сроком службы (пищевая упаковка, одноразовая посуда, пакеты, различная тара), а также в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов.

Как молочная кислота, так и лактид, проявляют оптическую активность, то есть существуют в виде двух L- и D-стереоизомеров, являющихся зеркальным отображением друг друга. Варьируя относительное содержание этих форм в полилактиде, можно задавать свойства получаемого полимера, а также получать различные классы полилактидных материалов. Полилактид из 100 % L-лактида (L-ПЛА) имеет высокую степень стереорегулярности, что придает ему

кристалличность. Температура стеклования L-ПЛА: 54–58 °С, температура плавления 170–180 °С, скачок теплоёмкости 100 % аморфного ПЛА 0,54 Дж/(г·К). Используя при полимеризации смесь D- и L-форм лактида, получают аморфный полилактид (L, D-ПЛА), температура стеклования которого составляет 50–53 °С, плавление отсутствует, так как нет кристаллической фазы.

Самая высокая температура плавления у стереокомплекса, состоящего из чистого L-ПЛА и чистого D-ПЛА. Две цепочки сплетаются, и образующиеся дополнительные взаимодействия между ними ведут к повышению температуры плавления (до 220 °С).

Применение. Полилактид применяется для производства экологически чистой биоразлагаемой упаковки, одноразовой посуды, средств личной гигиены. Биоразлагаемые пакеты из полилактида используются в таких крупных торговых сетях как Wal-Mart Stores и Kmart. Ввиду своей биосовместимости полилактид широко применяется в медицине, для производства хирургических нитей и штифтов, а также в системах доставки лекарств. Полилактид отвечает концепции устойчивого развития, так как для его синтеза используются ежегодно возобновляемые природные ресурсы. Упаковочные изделия из полилактида — экологически чистая альтернатива традиционной бионеразлагаемой упаковке на основе нефти. Полилактид также применяется в 3D-принтерах в качестве исходного материала для печати. PLA пластик сегодня рассматривается, как альтернатива ABS-сплавам. Полилактид изготавливается из натурального сырья, поэтому принадлежит к узкой группе биоразлагаемых полимеров. Во время печати сплав почти не выделяет неприятных токсичных испарений, что многими пользователями воспринимается исключительно положительно. Кроме того, состав сравнительно легко утилизируется.

Используя PLA, можно добиться более высокой скорости и точности печати. С другой стороны, даже широкий ассортимент цветовых исполнений не скрашивает тот факт, что изделия, изготовленные из данного материала отнюдь недолговечны, не отличаются высокой прочностью и хорошей термоустойчивостью. Использовать его рекомендуется преимущественно в декоративных целях. Усовершенствованные материалы на основе классических сплавов помимо PLA и ABS, представленных в чистом виде, на рынке трехмерной печати можно купить их усовершенствованные сплавы. Пионером и флагманом в данном направлении является компания

Formfutura. На сегодняшний день ассортимент компании насчитывает несколько вариантов катушек с пластиковой нитью.

EasyFil HIPS – это филамент (нить), разработанный на основе PLA-пластика. Его структура усилена высокопрочным полистиролом, что позволило приблизиться к показателям прочности и термоустойчивости классической ABS пластмассы, сохранив при этом преимущества базового состава.

EasyFil ABS предназначен для создания деталей и комплектующих для сложных механизмов. Состав может похвастаться завидной ударопрочностью и высокой крепостью. Его сложно сломать или надломить. Такой пластик для 3D-печати определенно понравится изобретателям и инженерам-любителям, которые задействованы в прототипировании инновационной продукции. Производитель KeyTech решил не оставаться в стороне и разработал собственный вариант усиленного PLA. Филамент получил название PLA LAYER. Настоящую популярность новинка получила после того, как стало известно о присвоении ей сертификата безопасности для изготовления пищевой утвари. Отмечается, что биоразлагаемый пластик способен продержаться под воздействием погодных факторов до 60 дней, без потери базовых характеристик прочности и термоустойчивости.

Если пластик для 3D-принтера можно смело назвать обкатанным и проверенным материалом, то керамический порошок, металлическая глина и фотополимеры только начинают свой путь на стези домашней печати.

В промышленности все вышеперечисленные материалы используются сравнительно давно. В быту можно встретить только картриджи с фотополимерной смолой для стереолитографических аппаратов.

Керамический порошок и металлическая глина имитируют характеристики металлических сплавов и натуральных глиняных смесей, которые используются в промышленности. Пока они не подходят для печати методом послойного наплавления, но принтеры, поддерживающие технологию селективного лазерного спекания, отлично справляются с ними. Говорить о том, что данные материалы вскоре появятся на вашем столе, – еще рано.

Фотополимер – вещество, изменяющее свои свойства под воздействием света, чаще ультрафиолетового. До светового воздействия в основном мягкий и светочувствительный материал.

Фотополимер применяется в стоматологическом протезировании для заполнения форм, в изготовлении типографских клише для штампов (печатай), микросхем и печатных плат и в других областях.

Процесс изготовления при использовании одного из популярных фотополимеров:

1) фотополимер в виде мономера или низкомолекулярного полимера, как правило, находящихся в жидком состоянии, подвергается активному световому воздействию с длиной волны около 365 нм (при облучении ртутной кварцевой лампой), при этом засвеченные зоны мономера полимеризуются;

2) после воздействия света неполимеризованные участки смывают с помощью подходящего растворителя, полимеризованные участки в подобранном растворителе не растворяются;

3) на завершающем этапе производят сушку изготовленного изделия от остатков растворителя.

Иногда, для придания большей прочности изделию, после сушки, его снова подвергают воздействию полимеризующего излучения, при этом повышается степень полимеризации, и, соответственно, прочность и стойкость к растворителям.

Для некоторых фотополимеров возможен процесс фотодеполимеризации, при этом, полимеризованные участки снова переходят в исходный мономер, который далее может быть смыт растворителем. Как правило, для деполимеризации используется излучение с более короткой длиной волны, например, порядка 254 нм.

В современном производстве для изготовления печатных форм используют различные источники света для фотовоздействия, среди них различные ультрафиолетовые источники излучения, например, кварцевые ртутные лампы среднего, высокого и низкого давления, наполненные аргоном лампы, фотографические лампы накаливания, импульсные ксеноновые лампы, электродуговые угольные светильники, высокоинтенсивные светодиоды и т. п.

Порошкообразный полиамид применяется в основном для функционального моделирования, макетирования и изготовления контрольных сборок. Полистирол используется для изготовления литейных выжигаемых моделей.

Развитие SLS-технологии стимулировало и развитие технологий получения порошков металлов. На сегодняшний день номенклатура металлических композиций имеет широкий спектр материалов на основе Ni и Co (CoCrMo, Inconel, NiCrMo), на основе Fe

(инструментальные стали: 18Ni<sub>3</sub>O, H1<sub>3</sub>; нержавеющая сталь: 316L), на основе Ti (Ti6-4, CpTigr1), на основе Al (AlSi10Mg, AlSi12). Производятся порошки бронз, специальных сплавов, а также драгметаллов – главным образом для нужд дентальной медицины.

Из металлических порошков «выращивают» заготовки пресс-форм, специальные инструменты, оригинальные детали сложной конфигурации, которые затруднительно или невозможно получить литьем или механообработкой, импланты и эндопротезы и многое другое. Уже сейчас при штучном и мелкосерийном производстве зачастую становится экономически выгодным «вырастить» небольшую партию деталей на SLS-машине, чем изготавливать литейную или штамповую оснастку. В сочетании с HIP (Hot Isostatic Pressing – горячее изостатическое прессование) и соответствующей термообработкой такие детали не только не уступают литым или кованным изделиям, но и превосходят их по прочности на 20–30 %.



## Литература

1. Воскобойников, В. Г. Общая металлургия: учеб. для вузов / В. Г. Воскобойников, В. А. Кудрин, А. М. Якушев. – 6-е изд. перераб. и доп. – М. : Академкнига, 2000. – 768 с.
2. Симонян, Л. М. Металлургия спецсталей. Теория и технология спецэлектрометаллургии. Курс лекций : учеб. пособие / Л. М. Симонян, А. Е. Семин, А. И. Кочетов. – М. : Учеба, 2007. – 179 с.
3. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства: учеб. пособие для вузов / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, В. Н. Эктова. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 415 с.
4. Прецизионная обработка металлургических расплавов / Д. А. Дюдкин [и др.]. – М. : Теплотехник, 2007. – 424 с.
5. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства : в 2 ч / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, Н. В. Андрианов. – Минск : Новое знание: М. : ИНФРА-М, 2011. – 405 с.
5. Дои, Д. Конвертерное производство стали / пер. с яп. В. А. Митькина ; под ред. В. И. Явойского. – М. : Металлургия, 1971. – 296 с.
6. Общая металлургия : учеб. пособие. – М. : Металлургия, 1971. – 471 с.
7. Немененок, Б. М. Контроль качества продукции металлургического производства / Б. М. Немененок, П. С. Гурченко, Н. В. Рафальский. – М. : БНТУ, 2007. – 408 с.
8. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства. Формовочные материалы и смеси / Д. М. Кукуй, Н. В. Адрианов. – Минск : БНТУ, 2005. – 390 с.
9. Аттетков А. В. Методы оптимизации: учебник для вузов / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 2-е изд. – М. : МГТУ, 2003. – 439 с.
10. Композиционные материалы: справочник / В. В. Васильев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 510 с.
11. Зарубин В. С. Математическое моделирование в технике: учебник для вузов / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. – 2-е изд. – М. : МГТУ, 2003. – 495 с.

12. Гини, Э. Ч. Технология литейного производства: специальные виды литья / Э. Ч. Гини, А. М. Зарубин, В. А. Рыбкин ; под ред. В. А. Рыбкина. – 2-е изд. – М. : Академия, 2007. – 350 с.
13. Справочник по композиционным материалам: в 2 кн. / под ред. Дж. Любина ; пер. с англ. А. Б. Геллера, М. М. Гельмонта ; под ред. Б. Э. Геллера. – М. : Машиностроение, 1988. – 579 с.
14. Композиционные материалы: в 8 т. / ред. Л. Браутман, Р. Крок. – М. : Мир, 1978.
15. Попандопуло, И. К. Непрерывная разливка стали / И. К. Попандопуло, Ю. Ф. Михневич. – М. : Metallurgia, 1990. – 294 с.
16. Шульц Л. А. Элементы безотходной технологии в металлургии : учеб. пособие. – М. : Metallurgia, 1991. – 173 с.
17. Вихлевщук, В. А. Ковшечная доводка стали / В. А. Вихлевщук, В. С. Харахулах, С. С. Бродский. – Днепропетровск : Сист. технологии, 2000. – 190 с.
18. Авдеев, В. А. Основы проектирования металлургических заводов: справочник / В. А. Авдеев, В. М. Друян, Б. И. Кудрин. – М. : Интернет Инжиниринг, 2002. – 462 с.
19. Казачков, Е. А. Электрошлаковый переплав / Е. А. Казачков, А. Д. Чепурный. – Мариуполь, ПГТХ, 1995. – 82 с.
20. Мельниченко, А. С. Статистический анализ в металлургии и материаловедении / А. С. Мельниченко. – 2009. – 268 с.
21. Минаев, А. А. Вакуумная формовка / А. А. Минаев, Е. Б. Ноткин, В. А. Сазонов. – М. : Машиностроение, 1984. – 216 с.

## Содержание

1. Тема 1. Современные технологии при плавке и заливке литейных сплавов	3
2. Тема 2. Современные технологии при формообразовании	48
3. Тема 3. Современные технологии при подготовке производства	64
4. Литература	73

# **ПРОГРЕССИВНЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Пособие**

**для магистрантов специальности 1-42 80 01  
«Инновационные технологии в металлургии»  
дневной и заочной форм обучения**

**Составитель Герасимова Ольга Валентиновна**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 28.11.23.

Пер. № 54Е.  
<http://www.gstu.by>