

НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

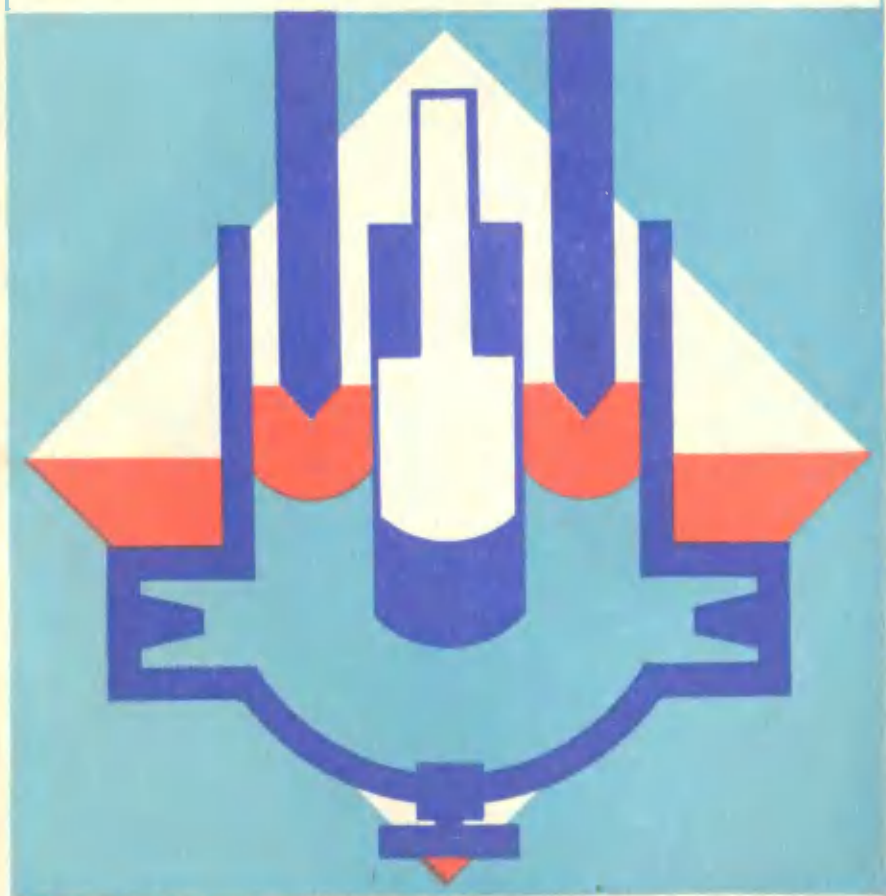
ЗНАНИЕ

6/1975

СЕРИЯ
ТЕХНИКА

А. А. ВЕРТМАН

ТОЧНОЕ ЛИТЬЕ



Вертман А. А.

В 35 Точное литье. М., «Знание», 1975.
64 с (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Техника», 6. Издается ежемесячно с 1961 г.)

Брошюра посвящена разнообразному миру литейного производства — одного из основных методов формообразования металла. Автор рассматривает теоретические основы формообразования, их техническую реализацию, а также конкретные приемы литья — литье по выплавляемым моделям, под давлением, электрошлаковое литье, жидкую штамповку и прессование в твердо-жидком состоянии, кристаллизацию под сверхвысоким давлением, получение профилей из расплавов и т. д.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся проблемами техники.

31204

6 П 4.1

О литейном деле

Литейное производство, т. е. получение фасонных изделий (отливок) заливкой форм жидким металлом, — один из древнейших методов обработки металлов. Уже в V тысячелетии до н. э. в Месопотамии и Египте существовало производство весьма разнообразных изделий: вооружения, украшений, предметов домашнего обихода и т. д.

Следует отметить, что принципиальная схема технологического процесса литья практически почти не изменилась за более чем 70 веков. Схема предусматривает четыре основных этапа. Первый — выплавка металлического сплава требуемого состава и перегрев его до температуры, обеспечивающей качественное заполнение форм. Обычно температура заливки металла в форму не превышает более чем на одну пятую температуру плавления сплава. Для приготовления литейных сплавов применяют самые разнообразные печи: шахтные, пламенные, дуговые, индукционные. В последнее время появились даже оптические печи, печи инфракрасного нагрева и др.

Второй этап — изготовление формы, которая, естественно, должна возможно более точно соответствовать изделию, ибо в противном случае существенно возрастают затраты труда на обработку отливок. Этот этап, пожалуй, наиболее важен, ибо необходимо учитывать особенности поведения металла при заполнении формы, кристаллизации и охлаждении. Дело осложняется тем, что различные металлы ведут себя при кристаллизации по-разному. Одни, как, например, сталь, дают усадку, другие, как чугун, наоборот, расширяются. Причем величина усадки зависит от множества других факторов, учесть которые заранее крайне затруднительно;

поэтому приходится изготавливать отливки со значительными допусками на обработку. Лишь в отдельных случаях при значительном усложнении технологии можно свести припуски к минимуму, а в пределе даже получать детали, не требующие дальнейшей обработки.

Изготовление формы предусматривает, как известно, предварительное создание модели, в размерах которой учтены особенности затвердевания металла, а конструкция должна обеспечивать легкое извлечение ее из формы. Однако изготовить модель определенных размеров еще недостаточно. Нужно создать вокруг нее достаточно огнеупорную среду, не взаимодействующую с расплавленным металлом и не разрушающуюся при его движении.

К огнеупорной среде, окружающей модель, предъявляется целый комплекс требований. Она должна быть достаточно пластичной, чтобы точно воспроизвести топографию модели, не прилипая к материалу последней; газопроницаемой, чтобы отводились газы, выделяющиеся при охлаждении; а после охлаждения отливки огнеупорная среда (называемая часто литейной землей) должна легко и полно отделяться от металла.

Мы упомянули лишь о малой доле требований к этапу изготовления формы. Не удивительно, что разнообразие их породило и разнообразие технологических приемов. Несмотря на это, можно выделить две группы методов, отличающихся по степени приближения размеров и формы отливки к соответствующим измерениям готового изделия. **Способы, гарантирующие большее соответствие, часто называют способами точного литья.** Но такое определение можно принять лишь в первом приближении, в дальнейшем мы его уточним. Здесь лишь отметим, что граница между способами точного литья и ординарными способами достаточно условна.

Для завершения краткого описания принципиальной схемы литья остается только упомянуть о заключительных стадиях технологии, а именно о заливке металла в форму, его кристаллизации, охлаждении и извлечении готовой отливки из формы.

Разнообразие приемов литья, сложившихся за длительный период развития технологии, позволяет получать как простые массовые детали, так и сложные узлы весом от десятых долей грамма до отливок, вес которых превышает 600 т. Но во всех случаях одна из глав-

ных проблем — повышение геометрической точности отливки, ибо именно это надежный метод снижения расхода металла, это уменьшает трудоемкость механической обработки, высвобождает металлорежущее оборудование, снижает себестоимость продукции.

В пределе вообще возможен переход от выпуска литых заготовок к выпуску литых деталей, пригодных для использования без последующей механической обработки.

Стремление максимально приблизить форму отливки к форме готового изделия было основной тенденцией технологии на всем протяжении развития литейного производства¹, однако и в наше время эту задачу нельзя считать полностью решенной. Причина в исключительной сложности процессов кристаллизации и формообразования, на ход которых влияет значительное число факторов, часто с трудом поддающихся учету.

Основное отличие точного литья от рядового — высокая геометрическая точность заготовок. Ее характеризуют размерная точность, высокое качество поверхности, отсутствие пространственных отклонений, точность конфигурации. Легко показать, что все четыре параметра — обязательные критерии технологии.

Ныне в понятие «точное литье» должен быть вложен более широкий смысл: это получение отливки, не только предельно близкой к изделию, но и с высоким уровнем эксплуатационных свойств металла.

Помимо геометрической точности, особое внимание уделяется чистоте поверхности. Шероховатость ее зависит от способа изготовления материалов формы, чистоты поверхности моделей пресс-форм и других факторов. Как известно, любые нарушения сплошности, особенно надрезы, — это концентраторы напряжений, которые способствуют образованию трещин. На поверхности литья часто выявляются скопления неметаллических включений как эндогенные, образовавшиеся в результате реакций, так и экзогенные — результат взаимодействия расплава с материалом формы. Неметаллические включения — также активные концентраторы напряжений. Наглядно доказать подобную роль неметалличес-

¹ Первые образцы литья, в том числе и точного, с применением каменного кокиля (формы) многократного употребления датируются V тысячелетием до н. э.

ских включений удалось лишь недавно, когда в СССР был разработан метод, использующий фотоупругость, — эффект изменения оптических свойств эпоксидной смолы, нанесенной на образец под действием нагрузки.

Обычно чистота поверхности точных литых заготовок соответствует 3—6-му классу, причем поверхностные дефекты (газовые раковины, трещины и т. п.) не учитываются.

Общепринятая классификация методов точного литья отсутствует, кроме того, существует много разновидностей одного и того же метода, поэтому целесообразно к методам точного литья отнести технологические процессы, ставящие своей задачей максимальное приближение формы отливки к форме детали при предельно высоком уровне свойств металла.

Для удобства изложения классификация методов, которые способны обеспечить получение точных литых заготовок высокого качества, представлена на рис. 1.

Необходимо подчеркнуть, что факторы, влияющие на точность отливки, в значительной мере зависят от специфичности метода. Например, при отливке в кокиль или под давлением на результат наиболее резко влияют: точность изготовления формы, постоянство защитного слоя, температура формы, плотность сопряжений, постоянство усадки и др. При литье по выплавляемым моделям упор делается (помимо, конечно, факторов, влияющих на состав и качество металла) на модельный состав, материал керамического покрытия, точность изготовления пресс-форм.

Способы точного литья описаны в литературе крайне неравноценно. По этой причине мы наряду с описанием используемых способов уделим внимание малоизвестным, но развивающимся, таким, как электрошлаковое литье, кристаллизация под сверхвысоким давлением, жидкая штамповка и др., которые, строго говоря, трудно отнести к собственно литейному производству.

Отдельные методы точного литья, учитывая их многообразие, нельзя рассматривать изолированно, вне связи с общими тенденциями машиностроения, литейного производства и даже более крупными системами, например, металлургия—металлообработка—энергетика, ибо научно-технический прогресс приобрел в нашу эпоху новые качественные черты. Теперь нельзя говорить только о прогрессе техники или отдельной отрасли нау-

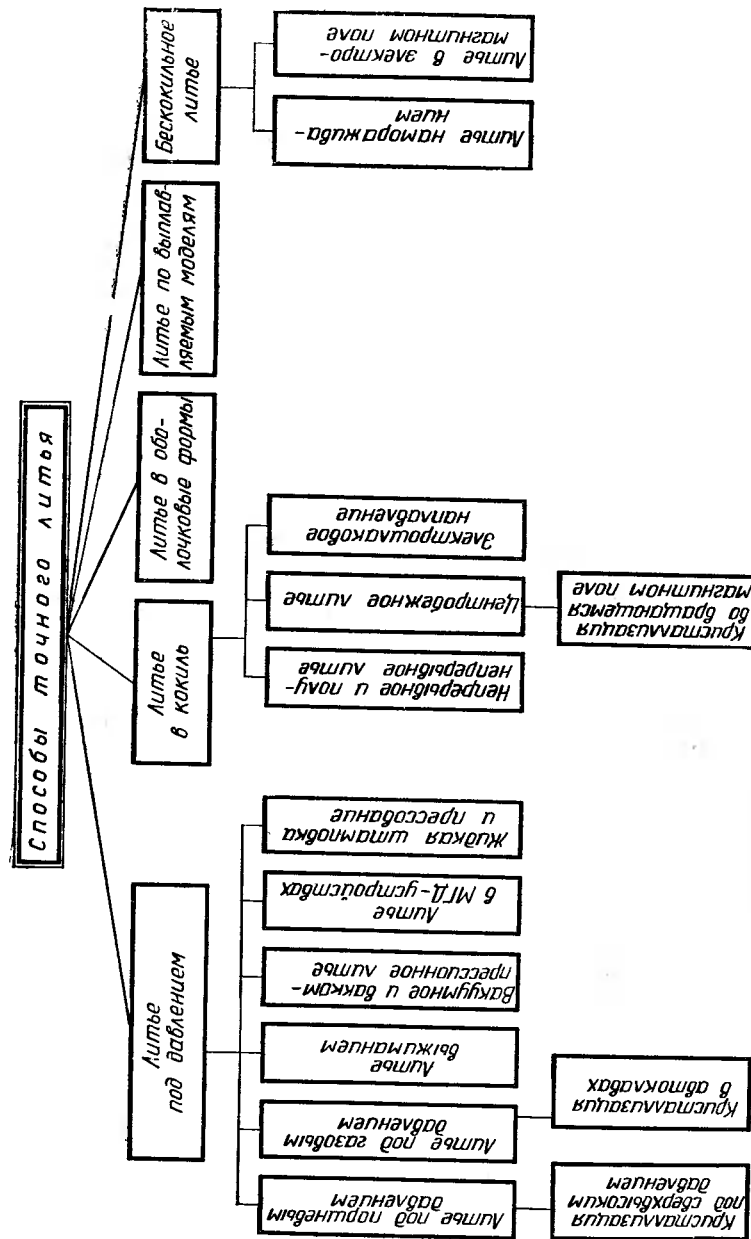


Рис. 1. Классификация способов точного литья

ки. Как правило, мы имеем дело с единым экономическим обусловленным явлением — научно-техническим прогрессом.

Металлургия и литейное производство относятся к числу наиболее капиталоемких отраслей промышленности, перестройка которых сопряжена со значительными трудностями, а изготовление нового оборудования занимает длительное время. Поэтому определяющее значение имеет выбор наиболее перспективного направления их развития. Исходя из этой концепции, мы прежде всего рассмотрим особенности и тенденции развития литейного производства СССР в данный период в целом и на основе анализа этих тенденций выявим значимость методов точного литья.

В процессе изложения мы старались избегать использования специальных терминов, там же, где это неизбежно, даны соответствующие определения. Наиболее часто в этой брошюре встречаются следующие термины: «кокиль», «опока», «пресс-форма». Поясним их. Кокилем называют простую, обычно металлическую форму многократного употребления. Опока — приспособление в виде жесткой рамы (открытого ящика) для удержания в нем формовочной массы в процессе изготовления разовой земляной литейной формы, транспортировки ее и заливки металлом. Опоки изготавливают из стали, чугуна, алюминиевых сплавов и реже из дерева. Размеры опок в СССР регламентирует ГОСТ. Пресс-формы используют при литье под давлением для удержания сжимаемого металла. Обычно пресс-формы изготавливают из легированной стали.

Направления научно-технического прогресса в литейном производстве

Оценивая основные тенденции литейного производства последнего десятилетия, необходимо констатировать снижение во многих странах темпов его развития. Так, например, в ФРГ за 1962—1971 гг. промышленное производство в целом возросло на 59,9%, объем производства продукции черной металлургии увеличился на 30,8%, а продукции машиностроения — на 34,5%. В то

же время выпуск чугунного и стального литья остался практически на прежнем уровне, увеличившись лишь на 4,1%, а потребление литья машиностроением снизилось примерно на 10% в связи с преимущественным развитием других методов формообразования: штамповки, высадки, накатки, сварки и др. За этот же период прирост производства стали в мире составил в среднем 5,7% в год, то есть был почти в 10 раз выше.

Согласно своду международных прогнозов «Мир в 2000 году»¹ до 1980 г. серый чугун сохранит свое доминирующее значение как литейный материал, позднее его роль станет менее значительной — возрастет выпуск алюминия и композитных материалов. В то же время резко увеличится производство высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. Уже к 1975 г. темпы роста производства высокопрочного чугуна, например в США, почти в 6 раз превысят темпы роста производства серого чугуна.

Для литейной промышленности технически развитых стран характерна тенденция к концентрации производства. Так, в ФРГ за три года число литейных предприятий сократилось с 1019 до 887 главным образом за счет предприятий, поставляющих чугунные заготовки. Несмотря на комплекс ценных свойств чугунного литья (доля которого в общепромышленном потреблении черных металлов, например в СССР, достигает 23% против 6,5% стального), оно постепенно должно уступить свои позиции другим методам формообразования. Ибо даже возможность изготовления сложных узлов, высокая циклическая вязкость, износоустойчивость, повышенная коррозионная стойкость, хорошая обрабатываемость, благоприятные литейные свойства и весьма низкая стоимость отливок, не превышающая обычно 5—7% стоимости изделия, и другие положительные качества чугуна — основного литейного материала современности не могут ныне противостоять органическим недостаткам литья как метода формообразования.

Что же это за недостатки? Прежде всего низкая производительность труда: в литейных цехах она в 12 раз ниже, чем в прокатных. Далее, прочностные характеристики чугуна за длительный период возросли

¹ Х. Байнхауэр, Э. Шмакке. Мир в 2000 году. М., «Прогресс», 1974.

существенно меньше, чем прочностные характеристики массового проката¹, поэтому ныне считают, что чугунное литье может быть заменено прокатом с коэффициентом замены 0,5—0,65, а в будущем по мере увеличения прочностных характеристик последнего коэффициент замены еще более понизится. Так, ныне развивается массовое производство высокопрочного проката с пределом прочности от 60 до 100 кг/мм² и текучести до 46—90 кг/мм². Использование таких сталей взамен рядовых позволяет экономить 30—40% металла и соответственно снижает коэффициент замены литья до 0,3—0,4. Экономия при замене каждые 2 млн. т чугунного и стального литья даже рядовым прокатом составляет свыше 1 млрд. руб. Фактически потери из-за применения литья вместо проката или изготовленных из проката штамповок еще выше, ибо при выплавке литейного чугуна производительность доменных печей падает на 25—30%.

В мировой практике производство проката превышает выплавку чугуна на 8—10%. В СССР пока наблюдается обратная картина. Существующее положение объясняется тем, что доля чугунных и стальных отливок в производстве машин в СССР 40% против 17—20% в технически развитых странах. Это обстоятельство увеличивает удельную металлоемкость машиностроения, которая в СССР еще на 25% выше, чем за рубежом. Например, расход металла на 1 л. с. в тракторостроении на 20% выше, вес дизельного мотора в 1,5 раза больше аналогичных американских. Особенно велика разница в весе тяжелого оборудования. Так, агрегат для резки полос из алюминия, созданный в СССР, весит 355 т, а японские — 120—130 т.

Сказанное с очевидностью убеждает, что ныне замена литья (особенно чугунного) другими способами формообразования, например штамповкой из листа, — прогрессивная тенденция. Хотя, конечно, существуют изделия, изготавливать которые еще длительное время будет наиболее экономично именно посредством литья. Это трубы, сложные отливки из тугоплавких металлов и т. д. Но и здесь конкурентоспособность метода во

многом определяется возможностью получать отливки, требующие минимума обработки. Важно подчеркнуть, что, как показывают расчеты, удельные капитальные вложения на 1 т штампованных изделий проката ниже, чем на 1 т чугунного и стального литья; а капитальные, необходимые для приращения мощностей на 10 млн. т штампованных изделий по сравнению с таким же количеством литья примерно на 3 млрд. руб. меньше, что равно стоимости металлургического завода (даже без учета эксплуатационных расходов).

Преобладание резания в отечественном машиностроении над более прогрессивными штамповкой, пресованием, накаткой, выдавливанием, сваркой вследствие недостаточного производства листового проката приводит к тому, что в стружку у нас уходит почти в 3—4 раза больше металла, чем в других странах. Не последнюю роль здесь играет и слабое развитие методов точного литья. Следствие подобной ситуации — значительно (в 3—3,5 раза) больший расход дорогих и трудоемких инструментальных и быстрорежущих сталей, что, так же, как и повышенный спрос на литейный чугун, снижает производительность труда и другие технико-экономические показатели не только машиностроения, но и черной металлургии. Подсчитано, что ежегодные расходы на сбор, транспортировку и обработку стружки 2—2,5 млн. руб., не считая капитальных вложений в здания, машины и оборудование, а для получения металла, который и пойдет-то в стружку, нужно дополнительно добывать 20—24 млн. т сырья.

Итак, чтобы достичь современного мирового уровня удельной металлоемкости продукции машиностроения, снизить общую материалоемкость, необходимо всемерно заменять литье на более эффективные методы формообразования. А там, где литье вне конкуренции, особенно при производстве узлов машин и сложных отливок из труднообрабатываемых сплавов, развивать методы изготовления точнолитых заготовок и в перспективе литых деталей с заданным уровнем надежности. При этом прежде всего следует обратить внимание на создание высокопроизводительных автоматизированных систем, позволяющих радикально поднять производительность труда. Однако решение такой генеральной задачи возможно лишь в том случае, если процесс формообразования будет описан с помощью объективных критериев

¹ Увеличение прочностных характеристик чугуна при одновременном увеличении пластичности в принципе затруднительно из-за наличия включений графита.

(управляющих воздействий), позволяющих заменить человека ЭВМ, а точнее — создать взаимодействующую систему человек—машина. Возможно ли ныне решить такую задачу? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно оценить уровень и полноту информации о научных основах формообразования.

О формообразовании

Создание технологии, опережающей нынешний уровень техники, возможно лишь на прочной научной основе при наличии объективной информации обо всем комплексе процессов точного литья. Однако наука о формообразовании еще далека от уровня современных инженерных дисциплин, например электротехники, позволяющих заранее рассчитать результат процесса. Не случайно долгое время, по крайней мере до 20-х годов текущего столетия, литейное производство именовали «искусством литья». Действительно, нам известно много выдающихся примеров точного литья, которые весьма затруднительно воспроизвести, даже используя арсенал нынешней науки. В качестве примера можно указать на знаменитый Царь-колокол, отлитый «артеллерийских и колокольных дел мастерами Иваном и Миханлом Моториными 25 ноября 1735 г.», и еще более раннюю работу неизвестного русского литейщика, отлившего самый большой колокол мира весом «до 12 500 пуд не хватает пятьсот»¹.

Наиболее результативный путь повышения надежности отливок и снижения брака — выявление количественных зависимостей, объективно отражающих влияние всего комплекса внешних факторов на качество отливки. А в будущем полная автоматизация процесса, что исключит субъективные факторы, отличающие искусство от науки.

Для удобства изложения и основываясь на современных представлениях науки, в процессе получения точного литья можно выделить по крайней мере три основных этапа.

¹ Колокол разбился при пожаре Москвы в 1704 г. Из его осколков отлит Царь колокол с сохранением деталей орнамента, но меньшего веса.

1. Стадия подготовки расплава — плавление, раскисление, рафинирование, модифицирование, легирование и т. п.

2. Стадия подготовки формы предусматривает максимальное приближение геометрических размеров заготовки к размерам изделия, а также наличие стабильных физико-механических и теплофизических свойств материала формы, что снижает вероятность образования дефектов.

3. Стадия формообразования — перемещение расплава в форму, соблюдение оптимальных условий кристаллизации и охлаждения, получение заданной структуры и свойств литого материала.

Следует отметить, что основные усилия ранее были сосредоточены главным образом на последних этапах процесса. Стадия подготовки расплава и роль жидкого состояния в формообразовании игнорировались. Но ведь именно в этот период в металле протекают важнейшие физико-химические процессы, определяющие его качество, в частности процессы всплывания неметаллических включений, дегазации, образования и дезактивации центров кристаллизации.

Роль жидкого состояния как важнейшего фактора литейной технологии впервые была вскрыта еще в работах академика А. А. Байкова, которого по праву считают основателем научной металлургии. Он писал, что металлургия только тогда превратится из искусства в науку, когда будут изучены свойства металлов в жидком состоянии.

Изучение свойств расплавов вблизи температуры плавления, закономерностей их течения в каналах, способов воздействия на металл в процессе кристаллизации началось лишь в 60-е годы. Основная трудность в создании действительно научно обоснованной технологии, а не эмпирически подобранной совокупности приемов, — дефицит экспериментальной информации о механизме важнейших этапов формообразования; экспериментальные исследования при высоких температурах крайне затруднительны и не могут обеспечить точность измерений, принятую в физике, химии и других точных науках. Серьезное препятствие и агрессивность расплавов, особенно железа и алюминия, по отношению ко многим материалам.

Тем не менее в последние годы достигнуты опреде-

ленные успехи в создании объективных методов исследования как свойств расплавов, так и закономерностей их движения. Эти работы частично обобщены в монографии автора, написанной совместно с академиком А. М. Самариним, поэтому приведем лишь несколько примеров, иллюстрирующих возможности современной техники эксперимента при высоких температурах. Так, применяя рентгеновскую кинорегистрацию процесса заполнения U-образной формы, используемой обычно для определения жидкотекучести (проба Нехендзи—Самарина), удалось зафиксировать отдельные стадии движения расплава в узких каналах, что позволяет на достаточно объективной основе описать закономерности движения жидкого металла при интенсивном теплоотводе¹.

Помимо рентгеновской аппаратуры, ныне применяются растровые электронные микроскопы, в которые можно наблюдать, например, процесс зарождения и роста неметаллических включений при высоких температурах. Методы локального рентгеновского анализа позволяют установить распределение компонентов в микрообъемах. Важный результат получен, в частности, в работе советского ученого Л. И. Ростовцева, установившего наличие в легированных хромом сталях эмульсии, капли которой содержат в 3—4 раза больше хрома, чем средний объемный состав стали, что позволяет говорить о расплавах как о дисперсных системах. К такому же выводу приводят многочисленные исследования свойств высокоуглеродистых расплавов железа, при проведении которых широко использовались современные методы исследования, а именно: измерялись вязкость, электропроводность, плотность, теплофизические характеристики, проводилось высокотемпературное центрифугирование расплавов, рентгеновская интроскопия и др.

Использование новейших методов исследования для анализа процессов формообразования позволило получить ранее недоступную информацию и сформулировать

¹ При археологических раскопках обнаружены каменные формы, датируемые IX в. Отливки, изготовленные в подобных кокилях, не найдены. Это позволяет предположить, что подобные формы использовались как проба на качество (жидкотекучесть) расплава. Вероятно, это первые «измерительные» приборы литейного производства.

основные положения, определяющие современные представления о свойствах расплавов вблизи температуры кристаллизации, представления, необходимые для направленного регулирования свойств отливок.

Итак, какие выводы можно сделать.

1. Реальные расплавы в широком диапазоне температур сохраняют наследственную структуру соответствующих твердых фаз. Такого рода неоднородность расплава называют динамической. Время жизни динамической неоднородности 10^{-10} — 10^{-12} с.

2. Расплавы содержат значительное число взвешенных твердых, жидких, газообразных включений, образующих устойчивую дисперсную систему. Такая неоднородность расплава получила название коллоидной. Время ее жизни сопоставимо с продолжительностью процессов плавки и выдержки металла.

3. Как коллоидная, так и динамическая неоднородность расплавов — следствие трудностей при растворении, причем любая неоднородность влияет на кинетику кристаллизации.

Из сказанного следует, что воздействия на состав, количество, форму, размеры и строение границ (когерентности) областей микрон неоднородности должны влиять на свойства отливки. Фундаментальные исследования советских ученых позволили сделать вывод о необходимости и принципиальной возможности направленного воздействия на расплав как в жидком состоянии в процессе плавки, так и в твердо-жидком состоянии при кристаллизации.

Важность научных результатов, полученных при изучении свойств металлов в жидком состоянии, для практики очевидна. Металлурги и литейщики получили еще одну возможность влиять на качество отливок. Журнал «Литейное производство» отмечал, что упомянутые выше «направления развития физико-химических основ теории металлических расплавов и динамики процессов их кристаллизации являются крупнейшим вкладом науки в революционное преобразование технологии литейного производства, и их последовательная реализация насущно необходима для удовлетворения потребности в высококачественных материалах для машин, рассчитанных на недоступные до недавнего времени нагрузки...»

Практическая реализация достижений науки уже

началась. Но металлурги и литейщики располагают ограниченным арсеналом средств воздействия: уровень и темп изменения температуры, давления, время выдержки. Рассматривая практические возможности направленных воздействий на расплав, в том числе методы подготовки металла к кристаллизации, следует отдать предпочтение тем, которые позволили бы в значительных пределах изменять один или несколько параметров, влияющих на конечные свойства отливки, т. е. на состав, количество, форму, размеры и когерентность областей неоднородности. К числу таких факторов нужно отнести температуру, давление и время выдержки в процессе плавки, вибрацию, давление, перемешивание при кристаллизации и др. Добавим, что воздействовать на металл в процессе кристаллизации легче, да и они (воздействия) сильнее влияют на свойства отливок, чем предварительная обработка расплава.

Практический выход фундаментальных исследований в области физической химии расплавов, в частности, — разработанные Институтом проблем литья и Институтом электросварки им. Е. О. Патона АН УССР (первые в мировой практике) принципиально новые методы плазменной, плазменно-индукционной плавки и электрошлаковой отливки, в процессе которых металл радикально очищается от газов и неметаллических включений; как следствие резко улучшаются его эксплуатационные и технологические свойства.

Предварительная подготовка металла, в частности, использование в качестве управляющих воздействий температуры и времени, позволяют улучшить качество отливок в том числе и их геометрическую точность.

Рассматривая пути усовершенствования методов точного литья, советские ученые В. А. Ефимов и Г. П. Борисов справедливо заключают: «...изыскание и освоение новых методов коренного улучшения качества жидкого металла перед заливкой форм должно явиться тем первым звеном технологической цепи, которое служит основой дальнейшего повышения качества точных отливок».

Использование методов физико-химического анализа для создания научных основ формообразования оказалось весьма плодотворным и при создании современной технологии изготовления форм, в том числе даже такого способа точного литья, как литье по выплавляе-

мым моделям, «возраст» которого не менее 1000 лет. Рациональный состав модельной композиции всегда считался основным «секретом» литья по выплавляемым моделям и ныне известно не менее 200 композиций, которые в отдельных частных случаях давали хорошие результаты, в то время как в массовом производстве практически используется лишь 5—6 составов. Выявление регламентирующих свойств из значительного числа параметров смесей и использование реологических констант в качестве объективного критерия позволили создать экономичные композиции с высокими эксплуатационными и физико-механическими свойствами.

Это еще один пример использования фундаментальных достижений физико-химической механики материалов, созданной в СССР академиком П. А. Ребиндером и его школой. Можно утверждать, что дальнейший прогресс в усовершенствовании наиболее трудоемкой стадии технологического процесса получения точного литья — изготовлении форм лежит в области использования новых материалов, создаваемых на основе физико-химической механики материалов и теплофизики.

В заключение расскажем о попытках создать объективные научные основы последнего этапа получения отливки, а именно формообразования. Следует отметить, что заливка в наименьшей степени претерпела какие-либо изменения за весьма длительный период. Основываясь на современных представлениях теплофизики, главным образом в работах В. А. Ефимова, А. И. Вейника, И. Б. Куманина и др., удалось установить закономерности влияния скорости кристаллизации на развитие зональной ликвидации (неоднородности) и выявить критические скорости, при которых ликвидация подавляется, т. е. выявить скорость кристаллизации, обеспечивающую получение однородной по свойствам отливки. Появилась реальная возможность создания новых способов литья, в которых надежность изделия не снижается вследствие ликвации.

Установлен также характер теплопередачи от отливки к форме, выяснены закономерности формирования неметаллических включений, роль перемешивания, диффузии и массопереноса. Но, пожалуй, наиболее важный общий вывод советских ученых, результат многолетних исследований процесса формообразования — безусловно, признание принципиальной возможности направлен-

ного регулирования свойств отливки с помощью внешних воздействий. По мнению советского ученого В. А. Ефимова, такими воздействиями могут быть:

1. Наложение постоянного и переменного электромагнитного поля для остановки конвективного движения жидкой сердцевины отливки или изменения направления этого движения.

2. Применение порошкообразных металлических холодильников (инкуляторов), снижающих температурный градиент и нарушающих циркуляцию незатвердевшего металла.

3. Увеличение скорости охлаждения любыми средствами.

Приведенная классификация не охватывает всех возможных управляющих воздействий. Более плодотворна классификация, которая представляет расплав как дисперсную систему. Согласно ей существует пять основных управляющих факторов, которые определяют возможность регулирования свойств отливки. Это количество, размер, форма, состав ассоциаций (диспергированных фаз), присутствующих в расплаве, и величина энергии связи между расплавом и частицей (или динамической ассоциацией — так называемым кластером).

Действительно, любые воздействия, будь то перегрев, выдержка, электромагнитные поля, вибрация, гравитационные воздействия, в конечном счете обязательно сказываются на величине одного или нескольких из названных факторов. А их изменение, в свою очередь, влияет на кинетику кристаллизации, структуру и свойства отливок. Для иллюстрации приведем характерный пример. При производстве чугуна в индукционных печах весьма результативным приемом оказалась «термовременная обработка», т. е. выдержка расплава в течение определенного времени при температуре порядка 1520—1540°С. В результате такой обработки существенно возрастают прочностные характеристики отливок, так как она способствует дорастворению пакетов графита, т. е. уменьшению числа и размеров диспергированной фазы. В том же направлении действует и вибрация (включая и ультразвуковую обработку)¹.

¹ Интересно отметить, что выдержкой жидкого чугуна как средством повышения прочностных характеристик пользовались еще в середине XIX в., задолго до того, как были сформулированы современные представления о строении расплавов.

Итак, несмотря на исключительную сложность механизмов всего комплекса процессов, объединяемых понятием «формообразование», в последнее время главным образом благодаря работам советских ученых намечились пути объективного их исследования. Разработаны по крайней мере качественные модели важнейших этапов формообразования. Можно добавить, что без дальнейшего развития теории формообразования и создания на этой основе новых технологических процессов производства отливок и в первую очередь точнолитых заготовок литье уже в ближайшей перспективе не сможет противостоять конкуренции других методов обработки металлов.

Современные способы получения точнолитых заготовок

Литье по выплавляемым моделям — один из наиболее древних способов¹. Он широко и издавна применялся для отливки скульптур, ювелирных изделий и т. п., но промышленно был освоен лишь в 40-х годах нашего века, когда удалось разработать механизированные и автоматизированные линии высокой производительности и стабильных показателей. Ныне область применения литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) — электро- и радиотехническая, автомобильная промышленность, производство турбин, велосипедов, инструмента.

Наиболее часто ЛВМ применяется для изготовления заготовок или литых деталей из материалов, с трудом поддающихся обработке, как правило из высоколегированных сплавов, редких и тугоплавких металлов. Припуски на механическую обработку могут достигать 0,2—0,7 мм, а чистота поверхности соответствует 4—6-му классу. Достоинство метода — возможность изготовления деталей с полостями, лабиринтами, а также узлов сложной конфигурации. Использование метода позво-

¹ Академик Б. А. Рыбаков считает, что первые отливки по выплавляемым моделям (украшения и предметы быта) появились не позднее IX—XI вв. в Приднестровье, причем модель изготавливали из навошенных шнуров, заплетенных в сложный узор наподобие кружев. Отметим как любопытный факт, что древними мастерами-литейщиками были только женщины.

ляет сократить парк металлорежущих станков, расход материалов, что особенно ценно при изготовлении отливок из дорогих сплавов.

Литье по выплавляемым моделям требует применения дефицитных материалов, технологический цикл получения заготовок весьма длителен, некоторые из применяемых материалов токсичны, общая затрата энергии на процесс значительна. Вес отливок колеблется от 10 г до 500 кг, однако это не предел. Наибольший экономический эффект литье по выплавляемым моделям дает при массовом и крупносерийном производстве.

Существо используемой ныне технологии в том, что из материалов с низкой температурой плавления и легкообрабатываемых изготавливают разовые модели деталей и литниковых систем, затем на собранный блок моделей наносят несколько слоев огнеупорного керамического покрытия толщиной 4—6 мм. После удаления материала модели оболочки заформовывают в опоках с применением упрочняющей засыпки и прокаливают при 850—950°С. Горячие формы заливают металлом. После остывания из формы извлекают деталь и обрезают литниковые системы.

Одно из наиболее эффективных применений метода ЛВМ — изготовление сборного режущего инструмента из точных литых заготовок, тем более что согласно подсчетам не менее 40% режущего инструмента может быть изготовлено методом литья. При этом стоимость цельнолитого инструмента в 2—3 раза ниже стоимости аналогичного инструмента из поковки или проката.

Применение литых заготовок инструмента позволяет полностью ликвидировать фрезерные и частично токарные операции. Пятилетним планом развития инструментальной промышленности на 1971—1975 гг. предусмотрено увеличение выпуска, например, сборных фрез в 1,3—1,5 раза, что позволяет в 2—3 раза сократить общий расход металла, снизить трудоемкость механической обработки на 70—80%, а себестоимость изготовления инструмента — на 20—30%.

Модельные составы. Выбор модельного состава представляет наибольшую трудность, так как ныне их известно несколько сот. Требования к модельным материалам весьма жестки. Так, они должны иметь минимальную усадку и минимальное расширение, низкую температуру плавления (до 100°С), хорошую жидкотекучесть,

обеспечивающую заполнение даже тонких полостей, прочно соединяться при сборке моделей в блоки и не взаимодействовать с керамическим покрытием. Наконец, материал не должен быть токсичным.

Наиболее распространены составы из парафина, стеарина, канифоли, воска, полистирола и др. В качестве упрочнителя чаще всего применяют этилцеллюлозу. Используют и пластификаторы — борную кислоту, касторовое масло; идеальный материал — ртуть, ее замораживают в пресс-форме при —60°С, но у ртути высокая токсичность.

Несмотря на многовековую историю литья по выплавляемым моделям, до сих пор не создан материал, отвечающий всем требованиям. Один из наиболее технологичных — смесь 50% стеарина и 50% парафина.

Основной недостаток легкоплавких модельных составов — дефицитность стеарина и низкая температура размягчения (30—35°С). Более высокая механическая прочность у смесей, содержащих церезин и полиэтилен, но у них пониженная жидкотекучесть и увеличенная усадка.

Часто используют для изготовления отливок повышенной точности и чистоты поверхности модельные составы на основе смол, однако и они не лишены недостатков. У них высокая температура плавления, хрупкость, малая жидкотекучесть. Коэффициент термического расширения модели из смол высок, это обуславливает значительные напряжения в керамической оболочке, из-за чего приходится использовать литейные формы с жидким наполнителем.

Большой интерес представляют модельные составы, разработанные в Московском авиационном институте. В них церезин, полиэтилен, битум, канифоль, электродный пек, парафин в различных соотношениях. Например, модельный состав МАИ содержит 16—18% церезина (марки 90, 93 или 100), 0,7—0,8% нефтяного битума, 1,7—1,5% полиэтилена (стабилизированного), 0,6—1,2% пека электродного, 0,6—0,7% сосновой канифоли высшего сорта, остальное — парафин. Более 75% весовых частей компонентов приходится на термоактивные смолы (канифоль, битум, электродный пек), которые значительно упрочняют керамическую оболочку после выплавления моделей и прокаливания.

В отдельных случаях используют модели из чистого

полистирола, они позволяют получить высокую точность изделия, прочны, тверды, теплостойки. Кроме того, у изделий хорошее качество поверхности, однако из-за низкой жидкотекучести необходимо запрессовывать смесь при значительном давлении (до 19,6 МН/м²), а удалять модели выжиганием.

Особый интерес представляют модели из пенистого полистирола, хотя пока этот материал широкого применения не нашел, несмотря на ряд преимуществ. Высокую чистоту поверхности изделия получают при объемном весе смеси выше 150 г/л, например чистоту поверхности 5—6-го класса обеспечивает пенополистирол, который запрессовывается с помощью термопластавтоматов и имеет объемный вес до 480 г/л. Однако известно, что, чем выше объемный вес, тем труднее удаляется модель. Поэтому усилия исследователей направлены на изыскание композиции с оптимальным объемным весом. Отметим, что чистоты поверхности 5-го класса удается добиться и при объемном весе 60—80 г/л при вспенивании полистирола токами высокой частоты или паром в автоклаве. Формовка моделей в пресс-форме происходит в этом случае при нагреве в течение 20—30 с, однако пресс-формы должны быть из неэлектропроводных материалов, например из полипропилена.

Несмотря на определенные трудности, пенополистирол позволяет получать отливки с точностью на 1—2 класса выше, чем у отливок, полученных с использованием парафино-стариновых составов. Основные недостатки технологии — недостаточная производительность и нестабильность качества моделей. Вероятно, наиболее перспективный путь устранения этих недостатков — литье моделей под давлением. Имеются данные, что использование двухпозиционных автоматов для литья под давлением моделей из пенополистирола дает экономический эффект 30—50 руб. на тонну.

Возможности пенополистироловых модельных составов еще выявлены не полностью. В частности, весьма перспективны опробуемое ныне вспенивание с помощью инфракрасного излучения, а также легирование пенополистирола. Сущность последнего способа в том, что гранулы пенополистирола смачивают 4—6% раствором поливинилбутирала в спирте и обсыпают порошком легирующего материала или модификатора, который сцепляется с поверхностью гранул. Метод интересен тем,

что позволяет ввести непосредственно в форму модификаторы и легирующие, что уменьшает угар и вторичное окисление.

Следует упомянуть также о растворимых модельных составах на основе технической мочевины (карбамида) с добавкой в качестве пластификатора 2% борной кислоты. Состав при затвердевании не дает усадки, а при растворении в воде исключается деформация формы. Модели из карбамида не размягчаются, они прочны, тверды, с чистой поверхностью, однако плохо соединяются и гигроскопичны.

Свойства модельных составов контролируются, причем наиболее важные критерии — усадка, прочность и содержание воздуха. Сборка моделей в блоки, как правило, требует применения ручного труда: их спаивают, склеивают, скрепляют механическим путем.

Изготовление керамических форм. Требования, предъявляемые к керамической форме, весьма жестки и разнообразны: она не должна взаимодействовать с модельным составом и металлом отливки, быть прочной и жесткой, газопроницаемой и податливой, а главное обеспечивать необходимую чистоту поверхности и геометрическую точность размеров отливки. Связующие растворы для тонкостенных керамических форм содержат этилсиликат, жидкое стекло и их производные. Помимо этилового эфира, ортокремниевой кислоты, в этилсилкате присутствует ряд полимерных соединений. Эффект действия связующих основан на реакции гидролиза, причем золь кремнезема переходит сначала в гель, а затем в твердое состояние; твердение смеси обычно заканчивается при прокаливании форм. Образующаяся пленка кремнезема прочно скрепляет частицы огнеупорного материала. Гидролиз этилсилката протекает медленно, поэтому используют растворители и катализаторы.

Суть операции изготовления керамических оболочек в том, что на модель наносят огнеупорную обмазку из смеси огнеупорного порошка и связующего, после чего вязкий слой обсыпают песком. Время между нанесением обмазки и началом обсыпки должно быть минимальным. Вязкость обмазок и размер частиц песка имеют важное значение. Наилучший метод обсыпки — в кипящем слое песка: перемещается песок, он проникает даже в тонкие пустоты; однако процесс должен тща-

тельно контролироваться, так как можно нарушить первый слой обмазки.

Выплавляют модели горячей водой, паром, горячим воздухом, растворением в воде и в перегретом модельном составе.

Формовка. Для упрочнения оболочек используют наполнители. Обычно это сыпучие огнеупорные материалы (кварцевый, цирконовый песок, шамотная крошка и др.). Используют также и жидкие наполнители (80—88 г кварцевого песка, 12—20 частей глиноземистого цемента и 30—40 частей воды). Технологическая живучесть жидкого наполнителя около 30 мин. В последнее время начинают распространяться жидкие самотвердеющие смеси (ЖСС).

Во время прокаливания форм удаляются влага, остатки модельного состава, а главное спекаются частички связующего материала с частицами огнеупорной обсыпки. В стенке оболочки появляются поры и трещины, что увеличивает газопроницаемость. Нагрев идет со скоростью до 150° в час, а выдерживают форму при $900\text{—}1000^\circ\text{C}$ в течение 1—2 ч, т. е. общее время прокаливания достигает 6—8 ч. Использование наполнителя усложняет технологию, так как формовать в этом случае можно только после прокаливания горячим наполнителем с температурой $400\text{—}800^\circ\text{C}$. Формы с жидким наполнителем выдерживают при 200°C , а затем нагревают до 900°C . Общее время прокаливания 12—20 ч.

Оценивая в целом уровень развития современного процесса точного литья по выплавляемым моделям, необходимо отметить, что наметился строго научный, на основе представлений физико-химической механики дисперсных систем подход к выбору модельной композиции. Благодаря использованию новых методов исследования, например термографии, удалось составить соответствующие таблицы структурно-механических свойств практически всех применяемых композиций, что существенно облегчает выбор состава. В принципе выбор может и должен осуществляться с помощью ЭВМ, что снизит вероятность ошибок и расширит число учитываемых факторов.

Определенный интерес представляет и применение методов планирования экстремальных экспериментов для выявления оптимального состава. Однако этот ме-

тод исследования, конечно, уступает методам, основанным на использовании ЭВМ, так как позволяет охватить лишь ограниченное число выходных параметров, например линейную усадку, теплоустойчивость, жидкотекучесть в пастообразном состоянии и прочность на изгиб, тогда как фактически модельная композиция определяется по крайней мере следующими параметрами: прочность, твердость, геометрическая точность, чистота поверхности, механическая однородность, усадка, расширение, температуры размягчения, зольность, жидкоподвижность, смачиваемость огнеупорной суспензии и т. п.

К числу перспективных направлений необходимо отнести и использование новых модельных композиций на основе пенополистирола, применение обжига форм в вакууме, термостойких формовочных материалов: циркона, плавленного кварца, муллита и др.

Большой интерес представляет и использование так называемых холодильников при изготовлении деталей. Они позволяют создать направленную кристаллизацию, что улучшает структуру отливки. Например, заливка металла в формы, нагретые до температуры $600\text{—}900^\circ\text{C}$, обеспечивает получение отливок, теряющих герметичность уже при $0,20\text{—}0,15\text{ МН/м}^2$ а при заливке в формы, нагретые до 1200°C , в которых применено дополнительное охлаждение — холодильники, порог герметичности поднимается до $24,7\text{ МН/м}^2$.

Весьма интересное направление — применение вибрации при кристаллизации отливок. Вообще попытки применить вибрацию как средство улучшения качества делали давно. Однако стабильность результатов была невысока, что объясняется необходимостью тщательного подбора режима вибрации, оптимального в конкретных условиях производства. Тем не менее вибрация при отливке, например, полых лопаток из жаропрочных сплавов (частота 40 Гц при амплитуде 0,8—0,9 мм через 25—30 с после заливки формы в течение 40—60 с) позволяет повысить плотность литья с $7,518$ до $7,643\text{ г/см}^3$, т. е. на 14,5%, предел выносливости изделий — на 35%. Причем разрыв между уровнем свойств литого и деформированного металла сокращается.

Помимо механической вибрации, в перспективе, вероятно, найдут применение методы магнитогидродинамического бесконтактного воздействия на металл при

кристаллизации, когда при пропускании через прибыль тока ультразвуковой частоты в магнитном поле, перпендикулярном току в расплаве, возникают колебания, передающиеся к фронту кристаллизации. В некоторых случаях при МГД-воздействиях наблюдается измельчение структуры. Но техническая сторона реализации метода, в частности подвод тока к прибыльной части, достаточно сложна и ненадежна.

Серьезный разговор идет и о расширении областей применения точного литья, например, использования его для получения изделий из титана и других тугоплавких металлов, а также из новых материалов с высокой твердостью — карбидов, боридов, нитридов и др.

До последнего времени получить расплав тугоплавких соединений, в частности карбидов, и использовать обычную технологию литья не представлялось возможным: многие карбиды переходят в жидкое состояние при температуре более 2000°C , а сплав карбидов гафния и тантала имеет, вероятно, наиболее высокую температуру плавления из всех твердых тел (3940°C). В связи с трудностями получения расплава подобных соединений пошли по другому пути, по пути так называемого шликерного литья. Из мелкого порошка твердых частиц с размером зерен от 1 до 8 мкм в водном растворе альгината натрия готовят суспензию и заливают ее в форму, полученную с помощью выплавляемой модели или другим методом. Например, при изготовлении инструмента из карбидов вольфрама и кобальта используют суспензию, содержащую 15% воды, 0,2% альгината натрия и 84,8% порошка карбидов. При шликерном литье приходится пользоваться, как правило, гипсовыми формами, поглощающими воду, а после длительной сушки (150—200 ч) отливок спекать их.

Хотя при шликерном литье используется не расплав, а водная суспензия, этот способ может быть отнесен к сфере литейного производства. С его помощью получают самые разнообразные изделия, в том числе и полые, сложной формы и с уникальными свойствами. Мы привели этот пример с целью показать исключительно широкие возможности метода литья по выплавляемым моделям.

Литье по выплавляемым моделям осуществляют на многих предприятиях. Так, на Подольском механическом заводе им. М. И. Калинина перевод на литье по

выплавляемым моделям только 8 позиций деталей швейных машин (отливки весом от 5 до 165 г) высвободил 310 рабочих, 308 станков, сэкономлено 1268 т металла в год и более 1,0 млн. руб.

На Ленинградском металлическом заводе им. XXII съезда КПСС освоено литье деталей турбин, компрессоров и насосов. При обработке профиля лопаток турбины из жаропрочных сплавов обычно используют уникальные фрезерные станки с объемными копирами, а выход годного при изготовлении деталей из поковок не превышает 10—15%. С применением точного литья коэффициент использования металла возрастает до 72—80%, так как литье выполняется с припуском не более 0,3 мм на шлифовку и полировку. Трудовые затраты на обработку одного комплекта сегментов сопел турбины ВПТ-50 сокращаются с 1730 до 840 ч (в нормочасах), стоимость обработки одного комплекта снижается с 479,3 до 221,5 руб., себестоимость с учетом накладных расходов падает с 2582,7 до 1338,7 руб., сквозной коэффициент использования металла возрастает с 0,14 до 0,52. Подобные примеры можно продолжать.

Литье в оболочковые формы. Один из основных недостатков литья как метода формообразования — его материалоемкость и связанная с этим низкая производительность труда. Действительно, на 1 т годного литья приходится перерабатывать от 4 до 12 т формовочных материалов. Ибо добиться требуемой прочности формы можно, лишь увеличив толщину слоя формовочной смеси, окружающей собственно рабочий слой, непосредственно контактирующий с расплавом.

Прочность формовочных смесей можно существенно повысить благодаря достижениям современной химии полимеров и материаловедения. Действительно, смесь, например, кварцевого песка и терморезактивной смолы, добавляемой в количестве до 5—9% к массе песка, характеризуется пределом прочности на изгиб до 100 кг/см^2 и на разрыв до $30\text{—}35\text{ кг/см}^2$, что почти в 20 раз превышает прочность песчано-глинистых смесей в сухом состоянии.

Высокие прочностные характеристики песчано-смоляных смесей позволили решить и другую задачу, а именно: повысить точность отливок и улучшить качество их поверхности. Схема нового технологического процесса, получившего название «литье» в оболочковые

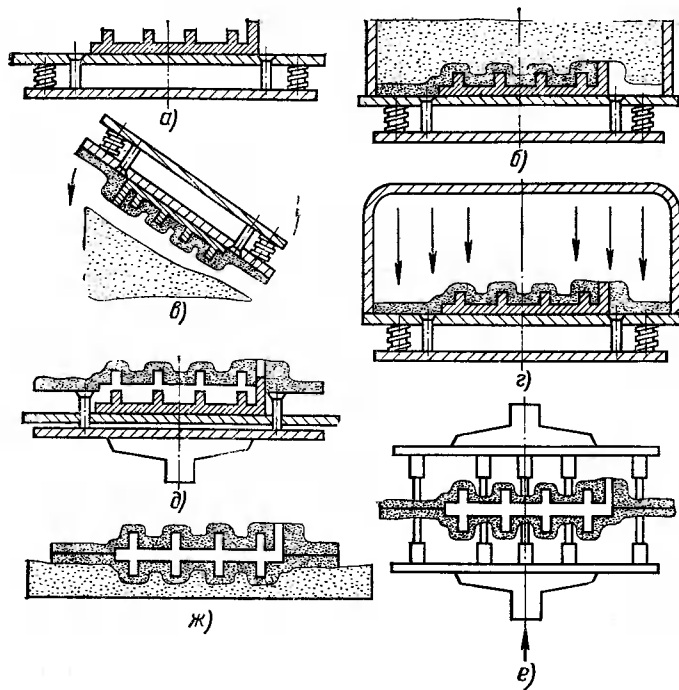


Рис. 2. Последовательность операций изготовления оболочковых форм

формы», приведена на рис. 2. Процесс складывается из нескольких этапов. Модель устанавливают на плиту (рис. 2, а) и засыпают смесью песка со связующим (рис. 2, б). Слой смеси, контактирующий с теплой моделью под влиянием температуры, схватывается, создавая оболочку, повторяющую рельеф модели. Избыток смеси сбрасывают поворотом плиты (рис. 2, в). Затем смесь прогревают с целью упрочнения (рис. 2, г) и отделяют оболочку от модели (рис. 2, д). Аналогично изготавливают вторую половину оболочковой формы. Обе половины склеивают под прессом (рис. 2, е) и собирают форму (рис. 2, ж), укрепляя стенки формы специальной смесью или металлической дробью.

Оболочковые формы высокогазопроницаемы, поэтому в процессе заливки металла удаляют газы, что существенно улучшает качество отливок. Достоинство метода — возможность легко освободиться от оболочки,

так как после выгорания смолы ее прочность падает.

Наиболее важно, как отмечалось, что способ позволяет получать отливки, точность которых соответствует точности модели. Так, при использовании алюминиевых сплавов, бронзы, и чугуна размеры можно выдержать с точностью от $\pm 0,38$ мм на размер 150—500 мм; расходы на механическую обработку снижаются на 20—25%.

Особенность оболочковых форм — полное отсутствие в них влаги, что исключает брак по газовым включениям и отбелу. Расход формовочных материалов, в частности песка, почти в 20 раз меньше по сравнению с обычной технологией изготовления песчано-глинистых форм и стержней. Очень важна для практики возможность длительного хранения и транспортировки форм.

Важно отметить, что по сравнению с песчано-глинистыми смесями скорость затвердевания в оболочковых формах в несколько раз выше, например, песчано-смоляные цирконовые формы повышают ее в 5 раз. Кроме того, метод позволяет упрочнять оболочки металлической дробью, что улучшает прочностные характеристики литья и увеличивает пластичность металла.

Преимущества литья в оболочковые формы особенно видны при массовом производстве, когда полностью оправдываются затраты на механизацию и автоматизацию.

Технология приготовления песчано-смоляных смесей. Для их изготовления используют огнеупорный материал, обычно песок, связующее (термореактивную смолу) и добавки. Есть два типа смесей: неплакированная, со смолой в виде порошка, смешанного с песком (вследствие значительной разности в плотности компонентов такая смесь постепенно расслаивается), и плакированная, она содержит смолу в виде тонкой пленки, обволакивающей (плакирующей) песчинки. У оболочки из плакированных смесей более высокие технологические параметры: лучшая проницаемость, большая прочность, меньший расход смолы.

Существенно влияют на качество отливок свойства огнеупорных материалов — кварцевого песка, электрокорунда, цирконовых и оливиновых смесей. Последние позволяют получить отливки более высокого качества, но стоимость литья существенно возрастает. Ныне для приготовления смесей используют термореактивные и

термопластичные смолы, обычно фенолформальдегидные с добавкой в качестве отвердителя 7—15% уротропина. Это позволяет получить, например, при использовании pulverбакелита (5%) предел прочности на изгиб материала оболочки порядка 48 кг/см².

Однако большинство фенолформальдегидных смол дороги и дефицитны. Создание более дешевых смол, по крайней мере равноценных pulverбакелиту, — весьма актуальная задача.

В смесь вводятся также увлажнители (керосин, глицерин и др.) в количестве 0,2—0,5%. Задача увлажнителей — снизить пылевыведение и потери при смешении. Применяют также растворители и специальные добавки. Растворители (ацетон, этиловый спирт, фурфурол и др.) в количестве до 2,0% используют для ускорения плакирования зерен огнеупорной смеси. Наконец, специальные добавки (окись железа, магнезия, хромомагнетит) вводят для улучшения качества форм. Для получения стальных отливок применяют, например, смесь из 67—65% песка, 5—7% pulverбакелита, 0,2% керосина, 1,4% ацетона, 1,2% фурфурола, остальное хромомагнетит. Прочность песчано-смоляных смесей в холодном состоянии увеличивается с содержанием связующего и может быть 100—120 кг/см²; в горячем состоянии она сохраняется до 500—700°С, затем по мере выгорания смолы падает. В зависимости от количества смолы меняется газотворность смесей, причем наибольшее количество газа выделяется в первые секунды нагрева.

Приготовление смесей может быть механизировано и автоматизировано. Обычно оно складывается из заполнения модельной оснастки, уплотнения, нагрева до 200—250°С, выдержки в течение 10—30 с для расплавления смолы, удаления избытка смеси, нагрева до 300—350°С с выдержкой в течение 1—3 мин для твердения оболочки и освобождения модельной оснастки. Известны многочисленные механизированные методы изготовления оболочек, в частности пескодувный (оболочки сложных очертаний), центробежный и др.

К достоинствам метода следует отнести возможность склеивания полуформ. Клеи на основе pulverбакелита неограниченно живучи при скорости твердения 40—45 с. Обязательная операция для крупных отливок — упрочнение оболочковых форм засыпкой. Часто для засыпки используют металлическую дробь диаметром 2—4 мм.

Разделение песка и дроби может быть легко механизировано.

Литье в оболочковые формы широко применяют в машиностроении для изготовления заготовок весом до 100 кг (так как точность более крупных отливок меньшая) 5—8-го класса точности и шероховатости 4—6-го класса. Толщина стенки отливки может быть в пределах 2—8 мм. Высокая газопроницаемость оболочковых форм обуславливает большую плотность отливок, чем при использовании песчано-глинистых форм. Отливки из малоуглеродистых сплавов в поверхностном слое науглероживаются, кроме того, часто наблюдаются случаи пригара, особенно если пески не отличаются высокой огнеупорностью.

На литье в оболочковые формы целесообразно переводить детали, не требующие разреза или имеющие простейший разъем, детали, обычное литье которых сопряжено с трудоемкой очисткой. Считают, что трудоемкость изготовления оболочковой формы в 5—8 раз ниже, чем песчано-глинистой.

Несмотря на большую стоимость песчано-смоляной смеси по сравнению с песчано-глинистой, при массовом и серийном производстве достигается значительный экономический эффект. Стоимость смолы может составлять 50—75% прямых затрат на рабочую силу и сырье (в зависимости от степени механизации), поэтому любой способ сокращения расхода смолы и применение более дешевых смол улучшает показатели технологии и расширяет границы приложения способа. Как сократить расход смолы, известно. Это, в частности, метод двойной засыпки, когда форму изготавливают из смесей с различным содержанием смолы и песка различной крупности, и др.

Литье в оболочковые формы применяют ныне для изготовления деталей преимущественно из сплавов железа (серый, ковкий, высокопрочный чугун, углеродистая, нержавеющая сталь, жаропрочные стали), а также деталей из медных, легких и специальных сплавов. Способ освоен на ряде отечественных предприятий. Например, на киевском мотоциклетном заводе так отливают ребристые цилиндры из модифицированного хромоникелевого чугуна. Толщина оболочки около 10 мм. Создана поточная механизированная линия, годовая экономия от ее использования составила 28 тыс. руб. Из-

готовление стальной арматуры литьем в оболочковые формы снизило себестоимость на 10—15%. На заводе тяжелого машиностроения в г. Электросталь изготавливают конические шестерни с литым зубом и другие детали. Общая экономия только по одной детали 14 110 руб. в год. На Горьковском автозаводе в оболочковых формах получают коленчатые валы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.

По имеющимся данным, себестоимость одной тонны литья в оболочковые формы на 27% ниже, чем в земляные. В целом метод имеет еще много резервов и, безусловно, найдет широкое применение в промышленности.

Литье под давлением — один из наиболее производительных способов получения отливок высокой точности и чистоты поверхности. К числу его достоинств относится возможность изготовления сложных и тонкостенных деталей, малая материалоемкость, улучшение условий труда. Чистота поверхности при литье под давлением достигает 5—8-го класса, но ухудшается по мере износа формы. Особенность метода — высокие скорости поступления металла в форму и теплоотвода, что, как правило, предопределяет получение мелкозернистой структуры.

Есть и недостатки — ограниченность габарита и веса деталей, трудность отливки деталей с внутренними полостями, сложность оборудования, установка и эксплуатация которого рентабельна только при крупносерийном и массовом производстве.

Суть литья под давлением в том, что расплавленный металл заполняет форму и кристаллизуется под избыточным давлением, после чего форму раскрывают и отливку удаляют. По способу создания давления можно выделить разновидности метода: литье под поршневым и газовым давлением, вакуумное всасывание, литье выжиманием, жидкая штамповка, кристаллизация под сверхвысоким давлением, кристаллизация в электромагнитных полях. Наиболее распространено формообразование под поршневым давлением при использовании литейных машин. Однако пока оно применимо главным образом для получения тонкостенных деталей из цветных сплавов. Увеличение стенки отливки до 6 мм и выше обычно приводит к газовой пористости.

По сравнению с другими методами литье под дав-

лением экономит 30—50% металла (по весу) и часто в десятки раз снижает общую трудоемкость изготовления детали. Основные направления его развития — использование новых, особенно бесконтактных способов создания избыточного давления, усовершенствование соответствующих машин, увеличение веса и габаритов литья, повышение точности отливок, их армирование, автоматизация операций и др.

Влияние давления на качество отливки. С современных научных позиций процесс литья под давлением впервые рассмотрен выдающимся советским ученым академиком А. А. Бочваром и профессором А. Г. Спаским, которые показали, что давление улучшает питание междендритных и внутридендритных несплошностей, а это уменьшает пористость и объем усадочной раковины. Однако при литье под давлением наблюдается и другой эффект, а именно — значительное измельчение зерна, подобно тому, что имеет место при модифицировании. Чем можно объяснить это? Прежде всего отметим, что, обсуждая влияние давления на свойства кристаллизующихся отливок, нужно различать собственно кристаллизацию под давлением (до 300 МН/м²) и кристаллизацию под сверхвысоким давлением (более 300 МН/м²).

Необходимость такого разделения очевидна, ибо до давления порядка 100—300 МН/м² механизм кристаллизации, вероятно, изменяется мало, так же как и температура плавления металла или сплава. Например, изменение давления на 100 МН/м² изменяет температуру плавления алюминия на 6,4°С, цинка — на 4,5, меди — на 4,2°С. Изменение же давления в пределах, наиболее просто реализуемых техникой, т. е. в пределах 0,5÷1 МН/м², конечно, не влияет заметно на температуру начала кристаллизации. Тем не менее в этом диапазоне влияние давления особенно эффективно. Можно полагать, что здесь действует несколько факторов.

Во-первых, резко меняется скорость кристаллизации в связи с исчезновением воздушного зазора между кристаллизатором и отливкой. Во-вторых, по мнению некоторых исследователей, изменяется коэффициент теплопередачи на границе кристалл—расплав, так как там выделяется слой дисперсных пузырьков газа. Однако особенно важно, по-видимому, изменение межфазной энергии на границе кристалл—расплав, ибо работами

советского ученого С. И. Попеля показано, что межфазное натяжение существенно зависит от давления, причем характер его изменения связан с поверхностной активностью того или иного элемента. Отсюда следует, что влияние давления на структуру многокомпонентных сплавов не может быть однозначным, а зависит от наличия и концентрации поверхностно-активных элементов.

Наконец, укажем еще на одно важное явление, которое должно иметь место при кристаллизации под давлением. Выше мы уже отмечали, что все реальные сплавы содержат в большем или меньшем количестве диспергированную фазу в виде неметаллических включений, карбидов, сульфидов, нитридов, пакетов графита и т. п. В обычных условиях расплав в силу высокого поверхностного натяжения, не может затечь в трещины и другие нарушения сплошности включений. Поэтому в большинстве случаев включения не связаны с окружающим металлом (матрицей). Такого типа включения наиболее опасны как концентраторы напряжений. При увеличении давления расплав проникает в них и тем самым увеличивается связь между включением и матрицей, отчего резко сокращается вероятность возникновения трещин вследствие концентрации напряжений.

Оценивая в целом возможности направленного воздействия на кристаллизацию, следует отметить, что давление — один из наиболее результативных факторов внешних воздействий, тем более что фактор этот может использоваться в широком диапазоне — от вакуума до тысяч атмосфер, тогда как возможности изменения, например, температуры или времени ограничены.

Литье под поршневым давлением. Ныне так изготавливают отливки из алюминиевых, цинковых, магниевых и медных сплавов весом от нескольких граммов до десятков килограмм. В основном на качество литья под поршневым давлением влияют особенности заполнения формы металлом и режим охлаждения. Прочность отлитых под давлением деталей на 15—20% превышает прочность отливок в песчаных формах. Это объясняется более мелким зерном, кристаллизацией неметаллических включений в дисперсном, т. е. наименее опасном состоянии, снижением ликвации (неоднородности).

Существенный органический дефект литья под поршневым давлением — снижение, как правило, пластиче-

ских свойств вследствие образования газовой пористости при захвате поршнем воздуха. Из-за газовой пористости термообработать отливки невозможно, так как расширение газов искажает конфигурацию изделия.

Процесс литья под поршневым давлением должен проходить при минимальных потерях напора и минимальном трении расплава, что возможно, если питатель имеет значительное сечение. Это обеспечивает передачу статического давления поршня через расплав и способствует повышению плотности отливки.

Возможна и другая схема, когда питатель выполняется с узким сечением и за счет трения о стенки канала происходит некоторый разогрев металла. Расплав по каналам и в форме движется с большой скоростью, достигающей 100—140 м/с, и под давлением до 490 МН/м². При таких условиях заполняется форма за доли секунды. Высокая скорость, во-первых, позволяет расплаву заполнить даже весьма тонкие каналы и, во-вторых, способствует получению поверхности значительной чистоты.

Закономерности, определяющие движение расплава в каналах и в форме, в полной мере еще не раскрыты. Известно лишь, что на характер движения влияют вязкость, поверхностное натяжение, межфазное натяжение, характер теплоотвода и ряд других факторов.

Ныне различают несколько режимов заполнения: сплошное **ламинарное**, реализуемое при малых скоростях движения, сплошное **турбулентное** и **эмульсионное** — при наиболее высоких скоростях.

Для получения отливок с максимальной плотностью предпочтителен ламинарный режим, так как сохраняются условия, облегчающие удаление воздуха. Однако его можно использовать лишь для сплавов с широким интервалом кристаллизации. Обычно ламинарный режим возникает при скоростях от 0,5 до 1 м/с. С увеличением скорости впуска до 5—15 м/с налицо турбулентность. При вихревом (турбулентном) движении расплав захватывает воздух, продукты смазки и т. д., что, конечно, ухудшает качество отливок, и часто в них обнаруживаются пузырьки газов диаметром до 1,5 мм.

Турбулентные потоки возникают при использовании питателей малого сечения, которые затвердевают быстрее отливки, почему статическое давление практически

и не действует на отливки при кристаллизации. Но газы, захваченные потоком, расширяются и давят на кристаллизующийся металл, что способствует устранению усадочной пористости и более четкому заполнению даже тонких сечений. Кроме того, определенное влияние оказывает и давление воздуха в форме, так как полная герметичность канала маловероятна.

Заполнение формы эмульсией происходит при предельно высоких скоростях порядка 25—35 м/с. Удар струи о стенку формы образует весьма развитую пористость, причем размеры пузырьков много меньше, чем при турбулентном заполнении. Струя сильно разрушает форму, но тем не менее этот метод заполнения удобен при отливке тонкостенных заготовок. Тем более что при движении металла с большой скоростью через тонкие каналы он дополнительно разогревается, снижается его вязкость, улучшается заполняемость.

Конечно, наилучший метод устранения пористости — вакуумирование пресс-формы и предельное снижение содержания газов в процессе выплавки (вакуумированием металла в печи или в ковше). Предварительное вакуумирование требует некоторого усложнения конструкции, однако позволяет существенно, на 30—40%, снизить толщину стенок. Оптимальное давление зависит от литейного материала.

Разрежение в пресс-форме порядка 300 мм рт. ст. и ниже при заливке особенно металлов с высокой упругостью пара приводит к обратному эффекту — возникновению газовых раковин за счет испарения металла и снижения растворимости газов в вакууме.

Специфические особенности литья под давлением накладывают определенные ограничения на выбор сплава и конструкцию отливки. Основное требование к сплаву — узкий интервал кристаллизации. В противном случае трудно добиться равномерной плотности отливки и получить необходимую жидкотекучесть расплава. Кроме того, сплав не должен содержать элементов, легко окисляющихся при выдержке в раздаточных печах; он должен быть малой реакционной по отношению к материалу формы.

К достоинствам литья под поршневым давлением следует отнести возможность получения в отливках отверстий, не требующих дальнейшей механической обработки. Например, при заливке цинковых сплавов могут

быть получены сквозные отверстия диаметром 1,0 мм. Температура заливки жидкого металла зависит от конструкции литейной машины и химического состава сплава. Если пресс-форма перед заливкой не подогревается, то температура сплава практически мгновенно падает до температуры линии ликвидуса, поэтому перегрев в раздаточной печи не имеет смысла. Низкая температура формы ухудшает условия удаления воздуха и соответственно чистоту поверхности. Повышенная температура снижает производительность и ухудшает механические свойства отливок.

Расширению применения литья под давлением препятствует ограниченная стойкость материала пресс-формы. Ныне материалом пресс-форм служат легированные стали марок 5ХНМ, 3Х2В8, Х12М и др. Большой интерес в этом плане представляет плазменное напыление тугоплавкими металлами (обладающими значительным сопротивлением эрозии) поверхности пресс-форм.

Конструкции машин для литья под давлением весьма разнообразны. Все же можно выделить две группы: с горячей камерой и с холодной камерой прессования. Машины с горячей камерой прессования появились раньше. Их достоинство — высокая производительность, ибо нет надобности в специальном дозаторе. При каждом рабочем ходе поршня металл заполняет камеру прессования, причем величина дозы определяется объемом формы. Производительность машин такого типа может быть 1 запрессовка в секунду, усилие прессования — от 9,8 до 24,5 МН/м², что в значительной мере определяется низкой стойкостью материалов поршня и камеры, погруженных в жидкометаллический расплав. Следует отметить, что в последнее время появились материалы, стойкие к расплавленным металлам, с высокими прочностными характеристиками: силикографит, стеклографит, некоторые композитные материалы.

Во всяком случае необходимо специально указать на значительные возможности совершенствования машин для литья под давлением. Использование новых материалов позволит, вероятно, увеличить вес и габариты отливок, изготавливаемых на машинах этого типа, хотя и ныне из цинковых и магниевых сплавов получают изделия с габаритами 1500×1000×500 мм.

Машины с холодной камерой прессования развивают значительно большие давления — до 5000 МН/м². Их

используют для изготовления отливок весом 40—60 кг и площадью 5000—6000 см².

Интерес к литью под давлением во многом определяется возможностью автоматизации процесса. Один из наиболее ответственных узлов — дозатор расплава. Ныне применяют механические, пневматические, вакуумные и электромагнитные дозаторы. У первых ограниченные возможности и пригодны они лишь для дозирования малоагрессивных сплавов с низкой температурой плавления. Вакуумные дозаторы можно использовать лишь тогда, когда упругость пара расплава достаточно низка; известны вакуумные дозаторы, позволяющие дозировать даже жидкую сталь. Недостаток — ограниченная высота подъема расплава — 1,4 м для стали и чугуна. От этого недостатка свободны пневматические устройства.

Наиболее перспективны электромагнитные дозаторы, хотя из-за сложности они не нашли еще должного применения. Их принципиальное отличие от других подобных устройств — возможность компенсации тепловых потерь, так как часть энергии (до 30%), подаваемой к дозатору, преобразуется в тепло. Учитывая перспективность электромагнитного дозирования практически любых расплавов, в том числе и с высокой температурой плавления, упомянем некоторые наиболее интересные конструкции.

Значительный вклад в усовершенствование этого перспективного способа внесли Л. А. Верте, И. П. Повх и другие, причем обширные работы в этой области выполнены в СССР задолго до появления зарубежных конструкций.

Действие электромагнитного дозатора показано на рис. 3. Насос 2 индуктивного типа соединен с тиглем электропечи 1 и создает давление, запирающее выпускное отверстие печи. При перемене направления электромагнитного поля в канале насоса создается напор, выбрасывающий порцию металла через металлопровод 3 в форму 4. Количество расплава, стекающего в форму 4, определяется продолжительностью включения насоса. Тот, что показан на рисунке, потребляет 15 кВт и позволяет поднимать до 400 кг цинка в минуту на высоту 640 мм. Применение индукционных насосов позволяет стабилизировать скорость истечения металла в технологический агрегат.

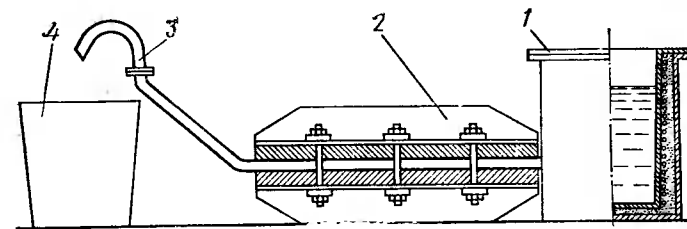


Рис. 3. Схема электромагнитного дозирования:

1 — электропечь; 2 — индукционный дозатор; 3 — металлопровод; 4 — форма

Литейщики весьма заинтересованы в **бесстержневом литье** полых изделий под давлением, создаваемым индукционным насосом. Хотя способы бесстержневой отливки полых изделий известны («литье с выплеском»), метод не нашел широкого применения из-за нестабильности результатов.

Применение реверсивного индукционного насоса позволяет заполнить форму под давлением, а затем «откачать» незатвердевший металл обратно в раздаточную емкость. Реверсирование поля осуществить проще, чем опрокинуть кокиль; можно автоматизировать этот процесс, но главное, конечно, — улучшение качества металла при кристаллизации под давлением.

Индукционные насосы могут развивать значительное давление до 0,49—0,98 МН/м², что вполне достаточно для реализации основных достоинств литья под давлением. Очень важно, что часть мощности насоса (до 30%) тратится на нагрев металла в канале. Это улучшает жидкотекучесть и позволяет снизить величину перегрева перед заливкой.

Основное препятствие на пути широкого внедрения магнитогидродинамических устройств — отсутствие надежных материалов для металлопроводов. Даже транспорт алюминиевых сплавов представляет собой сложную проблему из-за агрессивности алюминиевых расплавов. Поэтому весьма перспективным устройством следует признать так называемый безнапорный индукционный насос с огнеупорным каналом, позволяющий при мощности 150 кВт транспортировать до 400 т чугуна в час на высоту 2,6 м при угле наклона канала 45°. Такого рода устройства, конечно, могут найти применение в литейном производстве.

Литье под низким давлением. Основной недостаток литья под поршневым давлением — низкая стойкость материала пресс-формы и пуансона. От этого недостатка свободен метод литья под низким давлением, или, как часто его называют, метод литья под регулируемым давлением.

Последовательность технологических операций при литье под низким давлением следующая. Форму со стержнем устанавливают непосредственно на раздаточную емкость. При нагнетании воздуха через патрубок с клапаном металл поднимается по центральному металлопроводу и быстро заполняет полость формы. После непродолжительной выдержки раздаточную емкость соединяют со следующей предварительно подготовленной формой, и процесс повторяется.

Ныне метод литья под низким давлением используют при производстве массового чугунного литья, например, железнодорожных колес, слябов (практически из любых марок стали), в том числе и из нержавеющей, весом до 30 т и длиной до 10 м. Метод имеет ряд достоинств, в частности, автоматизируется весьма трудоемкая и материалоемкая операция заливки (или разливки в случае производства слитков); скорость потока металла в полости формы можно регулировать изменением давления и тем самым отливать крупные детали с тонкими стенками; можно создавать избыточное давление, что способствует улучшению качества поверхности и устранению газовой пористости; кроме того, высокая скорость кристаллизации исключает ликвацию. Наконец, при литье под низким давлением уменьшается расход металла на литниковую систему. В отдельных случаях, меняя состав атмосферы, создающей давление, можно воздействовать и на свойства отливки.

Фактически литье под регулируемым давлением имеет лишь один серьезный недостаток — низкую стойкость металлопровода, но и этот недостаток можно обойти. Впервые метод был применен в массовом производстве чугунных железнодорожных колес. Ныне только на одном из заводов их изготавливается 50 тыс. единиц в год. Аналогичный метод используется еще на восьми заводах для отливки колес. Широко применяется графит как материал формы, причем не только для отливки чугунных деталей, но и стальных, в том числе и слябов из нержавеющей сталей. Стойкость графито-

вых форм весьма высока и достигает 2 тыс. паливов, а при их охлаждении водой — 4—5 тыс. паливов.

Для форм применяют графитовые плиты и блоки значительной массы. Например, для отливки слябов из нержавеющей стали используют 10—12-метровые плиты толщиной до 500 мм и весом свыше 20 т. Для их изготовления создают уникальные прессы. В большинстве случаев, однако, нет, конечно, надобности в столь гигантских графитовых деталях. Важное достоинство графита как материала для литейной формы — возможность ремонта поверхности по мере разгара. Ремонт осуществляется с помощью металлических щеток. Для предохранения от разгара используют и специальные смазки.

Основные достоинства метода следующие: отсутствие контакта атмосферы с расплавом, что исключает вторичное окисление; скорость заливки может достигать 10 т/мин; можно с высокой производительностью изготавливать полые детали, трубную заготовку и другие изделия высотой до 8—10 м, весом до 30 т, гарантируя точность рельефа и размеров; быстрая кристаллизация отливок исключает развитие физической и химической неоднородности; поверхность деталей не требует, как правило, дальнейшей механической обработки; выход годного достигает 92—96%.

Наибольшие по объему производства установки литья под регулируемым давлением используются в черной металлургии. Сейчас в мире насчитывается 14 подобных установок, некоторые из них имеют годовую производительность свыше 200 тыс. т. Интересна компоновка установки одного из заводов, где ковш заменен индукционной печью, перемещающейся вдоль фронта неподвижных форм, что позволяет поддерживать постоянную температуру заливки. Часто раздаточную емкость помещают в герметичную камеру, и ковш поднимают постепенно по мере заливки. Это позволяет уменьшить площадь металлопровода, контактирующего с расплавом, ибо металлопровод — наиболее уязвимое место при изготовлении стальных отливок. Металлопровод для отливки крупных деталей изготавливают из высокоглиноземистых огнеупоров; трубы — длиной до 4 м и внутренним диаметром до 150—180 мм. Перед заливкой трубы приходится нагревать до 1000—1050°С в специальных печах, чтобы избежать растрескивания.

При изготовлении отливок из сложноперегородчатых сталей, содержащих хром, титан, алюминий и другие легкоокисляющиеся элементы, практически не меняется состав металла при заполнении формы. Высокая скорость кристаллизации способствует тому, что неметаллические включения приобретают в основном глобулярную, т. е. наименее опасную, форму. Это — достоинство метода.

Особый интерес представляет сочетание литья под регулируемым давлением с вакуумированием, тем более что наличие герметичных камер позволяет легко осуществлять подобный технологический прием.

Литье под регулируемым давлением имеет еще одну важную особенность, подробно исследованную советским ученым А. А. Рыжиковым с сотрудниками. Многочисленными работами было установлено положительное влияние предварительного заполнения пресс-формы кислородом при литье алюминиевых сплавов. Полагают, что в этом случае благодаря окислению металла в атмосфере кислорода нагревается тонкий поверхностный слой, что облегчает течение металла в узостях и тем самым способствует заполнению тонких сечений. Перемешивание металла в какой-то мере способствует благодаря поверхностному окислению прогреву и глубинных слоев.

Предварительное заполнение формы кислородом устраняет газовую пористость. В случае алюминиевых сплавов это, вероятно, связано с поглощением водорода твердыми частицами окислов. Такой механизм представляется вполне правдоподобным, если учесть значительную поверхность мельчайших частиц окислов, замешиваемых в металл при его движении в каналах и форме. Хотя сам по себе механизм процессов, улучшающих жидкотекучесть и точность воспроизведения рельефа алюминиевых отливок, и требует уточнения, положительное влияние окислительной атмосферы в пресс-форме при литье сплавов на основе алюминия несомненно. А это указывает еще на одну возможность совершенствования процесса литья под низким давлением.

Литье выжиманием. Метод можно рассматривать, по сути, как одну из разновидностей литья под давлением. Он предложен советским ученым Е. С. Стебаковым и используется для изготовления панельных деталей зна-

чительных размеров до 2—2,5 м, с толщиной стенки 2,5—5 мм.

Выжимание расплава, залитого в форму, производится либо поворотом полуформы, либо перемещением ее в горизонтальном направлении. Излишки сливаются в специальный ковш для последующей обработки. После затвердевания отливки подвижная полуформа возвращается в исходное положение. Полуформы изготавливают из металла и, как правило, снабжают нагревателями, так же, как и боковые щеки.

Несмотря на сложность установок для выжимания расплава и небольшой выход годного (8—10%), метод экономичен, так как позволяет снизить металлоемкость, а в некоторых случаях и трудоемкость изготовления сложных особенно клепаных узлов конструкций в 20—30 раз.

Серьезный недостаток метода — образование горячих трещин, так как отливка «испытывает» затруднения при усадке. Для борьбы с горячими трещинами применяют различные приемы, в частности, предельно снижают температуру заливки, применяют «ложные» технологические ребра и т. п.

Отливки, полученные выжиманием, высокоплотны, с мелкозернистой структурой, с хорошими механическими свойствами. Оценивая перспективы метода, необходимо отметить, что прогресс в создании новых высокотемпературных материалов в первую очередь на основе графита позволяет расширить области его применения. Ныне по крайней мере технически вполне возможно использовать его для производства, например, стального листа, оболочек и т. п.

Литье вакуумным всасыванием также можно рассматривать как разновидность литья под давлением, хотя характер кристаллизации в вакууме и под давлением, вероятно, различен. Скорость кристаллизации в вакууме меньше, так как зазор между стенкой слитка и кристаллизатором не устраняется, а снижение предела растворимости газов в вакууме способствует газовой делению. Этим методом можно получать отливки значительных габаритов, но простой формы, например втулки, трубные заготовки и т. п.

Использование вакуумного всасывания для литья втулок по ряду данных позволяет снизить расход ме-

талла в 2,5 раза, сократить брак почти в 5 раз, трудоемкость литья — на 40%, при этом выход годного возрастает до 80—82%. Благодаря высокой скорости кристаллизации разностенность полых отливок может быть сведена к минимуму.

Наиболее специфическая черта отливок, полученных вакуумным всасыванием, — крупнозернистость структуры. Недостаток — огранка внутренней полости отливки, так как корочка металла, контактирующая с кристаллизатором, охлаждается неравномерно. Уменьшить неравномерность охлаждения можно, либо снизив скорость охлаждения, либо модифицировав расплав.

Как известно, модифицирование устраняет в известной мере развитие транскристаллизации. Для получения стабильных результатов при использовании этого в целом перспективного метода важное значение имеет надежный контроль скорости процесса кристаллизации и толщины корочки. В 50-х годах, когда метод еще только осваивался, не было надежных бесконтактных методов контроля скорости кристаллизации. Сейчас такие приборы, позволяющие без контакта с расплавом оценить толщину корочки затвердевшего металла, имеются. Это позволяет на новой основе создавать автоматизированные установки для литья вакуумным всасыванием высокой производительности (которая составляет ныне, например для машины типа ЛВЧ-2, около 30 т в сутки при отливке слитков бронзы длиной до 1 м и диаметром до 120 мм при двух кристаллизаторах).

В последнее время появились сообщения о создании машины для непрерывной отливки слитков или слябов всасыванием расплава в кристаллизатор и непрерывным вытягиванием слитка вверх с изгибом в горячем состоянии. Такая схема установки для непрерывной разливки имеет ряд преимуществ, в частности отпадает проблема стойкости огнеупоров, стопоров, стаканов, проводок, облегчается замена кристаллизатора и т. п.

Оценивая перспективы развития метода в целом, необходимо указать, что наибольшие возможности открываются при изготовлении полых трубных заготовок из труднодеформируемых сплавов и особенно из тугоплавких металлов.

Перспективные способы точного литья

Электрошлаковое литье в охлаждаемый кокиль. Несмотря на все разнообразие методов точного литья, вес и габариты последнего ограничены, и до недавнего времени не существовало способа, позволяющего получать сложные крупнотоннажные узлы повышенной точности и удовлетворительного качества. Известно, что, чем сложнее и тяжелее узел, тем больше преимуществ имеет литье как метод формообразования. Однако качество литья, как правило, ухудшается по мере увеличения веса заготовки. Это объясняется действием ряда факторов. Прежде всего при большой массе отливки и, как следствие, малой скорости теплоотвода особенно в песчано-глинистых формах, которые обычно используют в производстве крупного литья, резко возрастает продолжительность контакта расплава с формой, развиваются ликвационные процессы. Кроме того, в процессе заливки форм имеют место вторичное окисление, эрозия литниковой системы, механический захват газов и еще целый ряд процессов, ухудшающих качество металла и снижающих точность отливки.

В целом можно считать твердо установленным, что качество литого металла, как правило, хуже качества деформированных заготовок.

Один из технологических приемов улучшения качества литья — ковка, однако и она не устраняет химическую неоднородность, а состояние поверхности даже ухудшается. В течение длительного времени перед конструкторами и технологами стояла дилемма: использовать ли литые заготовки, требующие меньшей трудоемкости при значительной массе, но с более низким уровнем физико-механических свойств, либо поковки, применение которых сопряжено с увеличением расхода металла и трудоемкости, но обеспечивает большую надежность узла и машины в целом.

Лишь в последнее время в СССР в Институте электросварки им. Е. О. Патона был разработан принципиально новый метод, открывающий широкие перспективы получения крупных отливок с высоким уровнем свойств и с повышенной точностью размеров. Он назван электрошлаковым литьем и представляет из себя даль-

нейшее развитие метода электрошлакового переплава (ЭШП) — одного из основных сейчас методов металлургии стали. Многочисленными исследованиями широкой номенклатуры сплавов и сталей установлено, что по своим свойствам металл, подвергнутый электрошлаковому рафинированию, не уступает ковальному. Металл ЭШП отличается даже большей плотностью, стабильностью свойств и изотропностью (свойства металла в продольном и поперечном направлении сближаются).

Специфическая особенность ЭШП — практически полное сохранение исходного состава при рафинировании. Однако количество, размеры и состав неметаллических включений существенно меняются. Второй важный момент — кристаллизация металла в водоохлаждающем кокиле.

После ЭШП литая сталь не уступает деформированной стали обычной выплавки по такому показателю, как критическая температуры хрупкости, а сопротивляемость разрушению, например, теплоустойчивой стали 15Х1М1Т выше таковой, чем у обычного литья, на 25%.

До сих пор мы говорили о сравнении сложившейся технологии ЭШП с обычным литьем, но метод электрошлакового переплава непрерывно развивается. Одно из его достоинств — возможность электрохимического модифицирования, т. е. обеспечение перехода из шлака в металл таких элементов, как магний, кальций и др., ввести которые в расплав затруднительно. А вследствие высокой чистоты металла даже обычные добавки, например редкоземельные металлы (РЗМ), дают в данном случае больший эффект и экономически оправданы, так как большая доля РЗМ расходуется по прямому назначению — для модифицирования, а не на удаление серы и кислорода.

Технологические возможности электрошлаковых процессов велики, они допускают обработку кристаллизующегося расплава вибрацией, ультразвуком, электромагнитными полями, введение металлических порошков для создания дополнительных центров кристаллизации и т. д.

Для литейного производства развитие метода электрошлакового литья (ЭШЛ) имеет, по нашему мнению, даже большее значение, чем для металлургии, которая располагает и другими методами радикального рафинирования стали и сплавов. В литейном же производстве

электрошлаковой процесс — качественный скачок, устраняющий ряд органических недостатков технологии.

При отливке особо сложных тяжелых деталей, например сосудов высокого давления, по обычной технологии никогда нет полной уверенности до окончания механической обработки в качестве изделия. Часто лишь после трудоемких операций отливки многотонной детали и ее обработки на металлорежущих станках выявляются неустраняемые дефекты литья: поры, трещины, неметаллические включения, неоднородность структуры.

Обычная технология отливки в земляные формы в принципе не способна ликвидировать неопределенность конечного результата. Другое дело электрошлаковое литье. В этом случае вместо земляной формы используют металлический, как правило, охлаждаемый кристаллизатор, предельно близкий по размерам и геометрии к отливаемой детали. В кристаллизаторе находится электропроводный шлаковый расплав, нагретый до температуры, превышающей иногда на 200—300°С температуру плавления металла. Стальной расходующийся электрод постепенно расплавляется и металл, не соприкасаясь с атмосферой, заполняет форму. Причем в процессе перемещения капель металла в шлаке и особенно на конце плавящегося электрода активно протекают процессы рафинирования: удаляется сера, неметаллические включения, кислород. Скорость заполнения формы и тепловой режим могут тонко регулироваться подводимой мощностью. Полностью отсутствуют литники и прибыль, что резко сокращает затраты на трудоемкие ручные процессы обрубки.

Ныне разработаны методы, позволяющие использовать не только твердые электроды, но и заливать жидкий металл, выплавленный в плавильной печи, что существенно увеличивает производительность.

Наконец, укажем еще на одну важную специфическую особенность новой технологии. При изготовлении изделий сложной формы, например коленчатых валов, можно сваривать отдельные части узла под слоем шлака, причем нет принципиальных ограничений веса отливков.

Важное достижение ЭШЛ — организация производства корпусов запорной арматуры из стали 15Х1М1Т, клапанов из аустенитных сталей, сосудов высокого давле-

ния и других сложных и трудоемких отливок. Электрошлаковым переплавом можно изготавливать валки станов холодной прокатки с высокими прочностными характеристиками, минимальным прогибом и износом, а также 100—150-тонные бандажные цементных печей диаметром до 6—7 м, шатуны судовых двигателей, толстенные сосуды, валы для мощных генераторов и другое тяжелое оборудование.

Известно, что проблема изготовления роторов турбогенераторов относится к числу сложнейших в литейном производстве и требует изготовления слитков весом до 300 т, уникального кузнечно-прессового оборудования и токарных станков гигантских размеров. Причем до окончательной обработки изделия опять-таки нет уверенности в его качестве. Метод ЭШЛ позволяет сваривать под шлаком несколько отливок и получать заготовку, предельно близкую по размерам к изделию с общим весом 400—600 т.

С другой стороны, в Институте электросварки им. Е. О. Патона решена проблема получения прецизионных зубных протезов и коронок, т. е. точного литья весом в несколько граммов. Пока еще явно недостаточно используется и отмеченная выше возможность получения композитных изделий, т. е. изделий сложной формы, которые получены путем сварки под слоем шлака отдельных деталей.

Весьма перспективно сочетание электрошлакового литья и литья под давлением, создаваемым магнитогидродинамическим насосом. В этом случае в установке ЭШЛ получают расплав требуемого состава и без контакта с атмосферой закачивают его под давлением в форму. Такая компоновка позволяет создать поточное производство деталей высокой надежности и резко увеличивает производительность труда в литейных цехах, что является ныне одной из наиболее актуальных задач.

Заканчивая рассказ об электрошлаковом литье, отметим, что хотя метод применяется ныне главным образом для производства стальных отливок, он несомненно пригоден и для производства отливок из цветных сплавов, в частности на основе меди, а также для ответственных отливок из чугуна. Отрадно отметить, что первые шаги в этом направлении уже сделаны в нашей стране.

Жидкая штамповка и прессование в твердо-жидком состоянии. Объем стального литья под давлением сравнительно невелик и ограничен небольшими деталями, что объясняется главным образом трудностями подбора достаточно стойких материалов пресс-форм. Даже для изготовления отливок из легкоплавких сплавов приходится применять дорогие стали, азотирование, хромирование, полировку матриц и пуансонов с целью увеличить ресурс формы, который для цинковых сплавов должен составлять не менее 80—100 тыс. наливов, для алюминиевых и магниевых — 30—60 тыс., для медных — 5—10 тыс.

Ибо только при достаточной стойкости формы можно оправдать затраты на ее проектирование и изготовление, а они весьма значительны. Например, на проектирование пресс-формы для отливки блока цилиндров автомобиля «Волга» было затрачено 1500 человеко-часов, а на ее изготовление — около 15 тыс. При получении стальных отливок трудоемкость изготовления пресс-форм не уменьшается, а стойкость их заведомо падает, поэтому особый интерес представляют попытки создания процесса жидкой штамповки стали.

Этот процесс был предложен еще в конце XIX в. русскими металлургами, но практического применения не нашел из-за отсутствия достаточно мощных и производительных прессов. Ныне эти трудности позади. Добавим, что для реализации процесса могут использоваться не только гидравлические прессы, но и другие принципы получения высоких давлений (согласно ряду изобретений высокое давление удастся создать испарением сжиженных газов или взрывом).

Суть процесса в том, что жидкая сталь заливается из сталеразливочного ковша в пресс-форму, изготовленную в виде системы кованых стальных шайб — бандажей. Затем пресс-форму подводят под пресс и прикладывают давление. Благодаря значительному теплоотводу через пуансон и отсутствию воздушного промежутка между стенкой изложницы и пресс-формой скорость теплоотвода резко возрастает. Полностью исчезают литейные пороки, в частности газовые пузыри, усадочная раковина, ликвация. Есть основания полагать, что подобный эффект возникает уже при давлениях порядка 39,2—98,0 МН/м², что в 5—8 раз ниже давления прессования металлов в пластическом состоянии.

Прогресс в области создания мощных прессов позволяет говорить и о совмещении кристаллизации с деформацией и получением выдавливанием через фильеру профиля самой сложной конфигурации. Это позволит предельно экономить металл в конструкциях, расширить номенклатуру изделий.

Ныне выполнено значительное число работ, установивших, что при кристаллизации расплава под поршневым давлением происходят следующие явления:

- изменяется характер распределения усадочных пустот по сечению отливки, так как под давлением они принудительно «запнываются» расплавом;

- увеличивается предел растворимости газов, в связи с чем большая их часть переходит в раствор, легируя металл;

- резко повышается скорость кристаллизации и уменьшается степень ликвации;

- измельчается структура металла, причем развитая столбчатая структура превращается в мелкую равноосную;

- механические свойства заготовки существенно улучшаются;

- размер неметаллических включений уменьшается, а их форма приближается к глобулярной, т. е. к наименее опасной.

Суммарное действие названных факторов проявляется в радикальном изменении свойств металла, закристаллизованного под давлением.

Следует отметить, что при нынешнем уровне развития машиностроения можно создать прессы с усилием до 75 тыс. т, т. е. обжимать слитки любых размеров. Однако такие прессы уникальны. Но даже усилие в 3—10 тыс. т предоставляет возможность обрабатывать слитки в 7—10 т и получать весьма разнообразную номенклатуру изделий, в частности полые трубные заготовки, заготовку для производства железнодорожных колес и т. п.

Это направление заслуживает серьезного внимания особенно как один из путей увеличения производительности труда в горячих цехах. Отметим также, что благодаря работам Физико-технического института АН БССР установлена возможность снижения затрат энергии при выдавливании металла через фильеру, если между пуансоном и металлом помещается слой изоли-

рующего и смазывающего вещества. Такое вещество для стали — графит, который, разрушаясь под давлением, увеличивает ресурс инструмента (фильеры), т. е. позволяет устранить главный недостаток метода кристаллизации под поршневым давлением в сочетании с деформацией.

Выше мы говорили о совмещении кристаллизации с прессованием в твердо-жидком состоянии значительных по массе слитков стали. Эта проблема, хотя и важна для системы металлургия—машиностроение, относится к будущему, и для ее успешного решения необходимо преодолеть еще много трудностей. Проще обстоит дело с формообразованием под давлением мелких заготовок для машиностроения, которое обычно называют жидкой штамповкой, хотя используют и другие названия: «прессование при кристаллизации», «литье с кристаллизационным давлением», «штамповка из жидкого металла», «кристаллизация под давлением». Сущность процесса жидкой штамповки в том, что жидкий металл, залитый в пресс-форму, выдерживают под давлением до окончания первичной кристаллизации.

Как установлено, увеличение давления сверх определенной величины для каждого сплава не так уж заметно улучшает свойства, а стойкость инструмента с увеличением давления падает. Даже при прессовании стальных деталей требуемое давление колеблется от 68,5 до 196 МН/м². Температура заливки металла должна обеспечивать достаточное его теплосодержание, чтобы метал оставался жидким до полного опускания пуансона. Обычно температура заливки на 50—100°С превышает температуру ликвидуса. Повышение температуры пресс-формы способствует сохранению теплосодержания расплава, но, с другой стороны, чем выше температура, тем тяжелее условия работы формы, поэтому для чугуна температура формы колеблется от 280 до 400°С, для стали — от 150 до 350°С.

Существенно усложняет технологию необходимость снизить до минимума продолжительность промежутка от заполнения формы расплава до приложения давления. Так, для слитка диаметром 90 мм время $t=10$ с, для слитка диаметром 125 мм $t=15$ с. Ограничение времени связано с опасностью окисления зеркала металла и ухудшения структуры.

Важный критерий технологии и время выдержки

при прессовании. Обычно считают, что время выдержки пропорционально диаметру отливки. Обязательный компонент технологии — смазка пресс-формы, причем выбор смазки во многом определяет стойкость инструмента.

Детали, полученные жидкой штамповкой, требуют минимальных припусков на механическую обработку: по наружному диаметру 0,6—0,8 мм для алюминиевых и цинковых сплавов и 1,0—1,2 мм на сторону для медных сплавов; по внутреннему диаметру 0,5—0,8 мм, по высоте 0,6—0,8—1,0 мм соответственно.

Развитие метода сдерживает отсутствие массового производства специальных прессов и недостаточная стойкость форм.

Отметим, что жидкая штамповка имеет ряд преимуществ перед кокильным литьем. (Выход годного 0,9—0,95 от металлозавалки, коэффициент весовой точности (отношение веса детали к весу заготовки) — 0,8—0,85, механические свойства находятся на уровне ковального металла, а часто и выше. При горячей штамповке коэффициент весовой точности 0,68 против 0,82 при жидкой штамповке в сравнимых условиях; производительность труда повышается в 6—8 раз, в 1,5—2 раза снижается стоимость изделия. Производство изделий жидкой штамповкой внедрено в СССР более чем на 150 предприятиях.

Разновидность процесса — штамповка металла в переохлажденном состоянии (в отличие от жидкой штамповки металл под давлением не выдерживают, а несколько раз ударяют пуансоном), а также двухстадийная штамповка (металл выдерживают под давлением до затвердевания большей части объема, а потом вводят пуансон в пластичную часть, сохраняющую еще высокую температуру). Именно последний способ, вероятно, наиболее интересен для производства слитков и трубной заготовки.

Кристаллизация под сверхвысоким давлением. Возможности литья под давлением далеко не исчерпаны. Тем более что ныне в промышленности используются еще сравнительно небольшие давления, которые прилагают лишь в процессе формообразования. Возникает вопрос: что может дать кристаллизация металла под предельно возможным давлением? (следует оговориться, что под сверхвысоким давлением в данном случае

мы понимаем давление более 98 МН/м²). Можно ожидать, что кристаллизация под сверхвысоким давлением (СВД) приведет к получению материалов с ранее недостижимым комплексом свойств. Для такого утверждения есть следующие основания.

Экспериментально установлено, что коэффициент зависимости температуры плавления от давления может иметь различный знак. Повышение давления, как правило, повышает температуру плавления. Исключение — висмут, галлий, германий, кремний, сурьма, чугун и другие сплавы, увеличивающие объем при кристаллизации. Повышение давления здесь снижает температуру плавления. Полагают, что в большинстве случаев кривая зависимости температуры плавления от давления достигает максимума и затем снижается. Экспериментально показано, что заэвтектические силумины (12—14% кремния, остальное алюминий) при кристаллизации под давлением около 1500 МН/м² становятся доэвтектическими, структура их измельчается, а свойства заметно улучшаются.

Второй важный фактор — увеличение вязкости с давлением. В пределе, вероятно, возможно получить столь вязкие расплавы, что в отливке сохранится беспорядочная структура, характерная для жидкости. Такого рода материалы могут быть названы квазикристаллическими и они должны обладать комплексом невиданных свойств, сочетая черты аморфных и кристаллических тел.

Наконец, с увеличением давления должна возрастать плотность металла (на 10—15%) вследствие исчезновения пор.

Но, вероятно, наиболее значимый вклад в получение отливок с особыми свойствами может внести изменение механизма кристаллизации под влиянием высокого давления. Экспериментально установлено, что с увеличением давления возрастает скорость охлаждения и меняются основные параметры кристаллизации — скорость роста кристаллов и число центров кристаллизации.

По-видимому, впервые кристаллизация жидкого чугуна под давлением от 300 до 3000 МН/м² изучена советскими учеными под руководством академика А. М. Самарина. Выяснилось, что радикально изменяется структура чугуна. Основа чугуна с разветвленными

включениями графита исчезает, появляются новые, ранее неизвестные фазы. Столь же радикально изменяются и свойства чугуна, например истираемость в режиме сухого трения при возвратно-поступательном движении снизилась более чем на порядок. Фактически после кристаллизации под сверхвысоким давлением был получен качественно иной материал, чем исходный серый чугун.

Исследования подтвердили вывод теории относительно возможности радикального изменения свойств металла при кристаллизации под сверхвысоким давлением. Задача дальнейших исследований — создать технологическое оборудование, в котором можно будет реализовать этот процесс в промышленных масштабах. Вероятно, прообраз таких установок — используемые ныне автоклавные печи, в которых высокое давление создается, например, испарением ожиженных газов.

Отметим, что устройства для получения высоких давлений испарением ожиженных газов известны и используются, например, для штамповки. Преимущества их (перед использованием для формообразования давления, создаваемого, например, взрывом) в компактности и плавном увеличении давления. Интересно, что способ отливки стали с использованием энергии пороховых газов предложен Гели-Газелатом еще в 1866 г. и подробно описан Д. К. Черновым. Метод не нашел применения, причем одна из важных причин, затруднивших его внедрение, — взаимодействие металла с продуктами сгорания, содержащими водород.

Большой интерес представляют исследования, выполненные в Харьковском авиационном институте, где разработаны установки различного назначения для брикетирования, резки металлов и т. п. В них используется давление взрыва, но передаваемое на пуансон-боек. Такого рода установки перспективны для литейного производства, порошковой металлургии и других отраслей техники как компактные устройства создания высокого давления в импульсе. Достаточно указать, что установка для резки квадратной стальной заготовки толщиной 150 мм занимает всего $0,36 \text{ м}^2$ и использует в качестве энергоносителя смесь природного газа и воздуха. Отметим, что импульсное прессование, позволяющее по крайней мере в принципе обрабатывать металл в твердо-жидком и твердом состоянии, снимает ряд

трудноразрешимых проблем — сохранение теплосодержания металла, залитого в пресс-форму, размещение и изготовление прессового оборудования.

Созданием высокого давления с помощью прессов, импульсных машин или испарением сжиженных газов не ограничиваются возможности современной техники. Во многих случаях эффективна компрессионная плавка и заливка формы в газостате, т. е. в сосуде высокого давления, стенки которого способны выдерживать давление в несколько тысяч атмосфер. В последнее время удалось создать весьма надежные конструкции газостатов, но работа с ними требует применения сложных и дорогих газовых компрессоров высокого давления. Это существенный недостаток схемы, но иногда, например, при выплавке лигатур на основе тугоплавких металлов, содержащих вещества с высокой упругостью пара, усложнение схемы оправдано, ибо не существует иных путей получения подобных сплавов.

Конечно, идеальные устройства для кристаллизации под сверхвысоким давлением, т. е. в которых нет сосудов высокого давления и не имеющие движущихся частей. Схемы таких устройств известны. Это, в частности, МГД-насосы, где в импульсе можно создать весьма высокое давление. Практическое освоение подобных схем — дело будущего.

Получение профиля из расплава (литье намораживанием). Получение готового изделия сложной формы вытягиванием из расплава впервые было опробовано советским ученым А. В. Степановым. Суть метода в том, что на зеркало расплава опускают огнеупорную плиту с отверстием, соответствующим профилю изделия. При нажатии на плиту из отверстия выдавливается расплав, в который опускают затравку, соответствующую требуемому профилю и выполненную из того же сплава, что и отливаемое изделие. За счет поверхностных сил расплав тянется за движущейся затравкой и постепенно кристаллизуется. Таким образом можно получать весьма разнообразные по форме изделия, но реализация метода требует строгого соблюдения теплового режима и согласования скорости вытягивания со скоростью охлаждения. Он целесообразен для сложных профилей, так как скорость вытягивания невелика.

Все изделия, полученные намораживанием, пока изготавливались из сплавов на основе алюминия. В извест-

ной мере это объясняется стабилизирующим действием тонкой пленки окислов, всегда присутствующей на поверхности кристаллизующегося расплава. Кроме того, поддержание стабильной температуры при формообразовании тугоплавких металлов затруднительно. Значительный шаг вперед в развитии метода — разработанная во ВНИИЭСО индукционная плавка на холодной опоре, позволяющая плавить практически любые металлы без контакта с тиглем и придавать столбу расплава (благодаря специальной конструкции индуктора) форму цилиндра, конуса, листа и даже тороида.

Формообразование намораживанием можно использовать и для получения заготовки из тугоплавких металлов, в том числе даже и из вольфрама.

Эта область литейного производства, безусловно, одна из наиболее сложных, а арсенал ее средств пока весьма ограничен. Однако возможность получать профили из материалов, не поддающихся обработке, открывает исключительные перспективы снижения металлоемкости заменой изделий из рядовых сплавов на сплавы с особыми свойствами.

К числу разновидностей метода намораживания можно отнести и изготовление отливок простой формы в электромагнитном поле. Он пока используется лишь для полунепрерывного литья слитков из алюминиевых сплавов (их отличает качественная поверхность отливки). Электромагнитное поле, создаваемое индуктором соответствующей конфигурации, поддерживает столб расплава в вертикальном положении без контакта со стенками кристаллизатора, что существенно сокращает затраты на материалы и оснастку. Однако перенести технологию отливки слитков сплавов на основе алюминия на стальное или чугунное литье затруднительно в связи с большей плотностью сплавов железа, а главное существенным (в 5—8 раз) различием в их электропроводности. Тем не менее работы этого направления весьма важны и актуальны, так как в случае их положительного завершения будет резко увеличена производительность труда и снижена металлоемкость.

К методам литья намораживанием часто относят способы и устройства для непрерывного и полунепрерывного литья, однако учитывая перспективность этого направления, целесообразно рассмотреть его более подробно.

Непрерывное и полунепрерывное литье. Первая схема машины для непрерывного литья была предложена еще Г. Бессемером в 1868 г. С тех пор появились сотни конструкций для производства деталей и заготовок весьма разнообразной формы. Преимущества непрерывного литья очевидны:

возможность получения отливки неограниченной длины при высокой стабильности свойств и размеров;

увеличение выхода годного и производительности вследствие меньшей ликвации, отсутствия литников, прибылей, снижения газовой пористости, улучшения поверхности, уменьшения загрязненности неметаллическими включениями.

Непрерывная разливка стали в настоящее время генеральное направление развития черной металлургии. В Советском Союзе впервые в мире сооружен крупный металлургический завод (Новолипецкий), где вся сталь разливается на установках непрерывной разливки.

Широкое развитие непрерывное литье получило и в цветной металлургии.

В литейном производстве применяют, как правило, машины полунепрерывного типа, хотя в последнее время предприняты попытки создать установки для непрерывного литья чугунных труб с последующим использованием отрезков труб при изготовлении радиаторов и других деталей.

Наиболее значительная область использования полунепрерывного способа — изготовление чугунных водопроводных труб и втулок. Способ, несомненно, один из наиболее перспективных, ибо он производителен, обеспечивает высокое качество, точность размеров, в нем отсутствуют трудоемкие процессы подготовки форм. Полунепрерывное литье в машинах вертикального типа позволяет получать трубы диаметром порядка 1000 мм и длиной до 10 м, что другими методами затруднительно. Внутренняя полость трубы формируется с помощью водоохлаждаемого стержня. Чтобы избежать схватывания металла со стенками кристаллизатора, последний совершает возвратно-поступательные движения вдоль оси трубы. Скорость вытягивания чугунных труб 2,2—2,5 м/мин, что почти вдвое превышает скорость вытягивания на установках непрерывной разливки стали.

Преимущество полунепрерывного литья чугунных труб и втулок в том, что высокое теплосодержание ме-

талла на выходе из кристаллизатора способствует самоотжигу. Так же можно получать гильзы крупных дизелей с заданной структурой, сложные профили с отверстием, заготовки для зубчатых шестерен, многогранные детали и др. В наибольшей мере преимущества полунепрерывного литья проявляются при изготовлении деталей из сплавов, не поддающихся механической обработке.

Однако несмотря на многие преимущества, непрерывное и полунепрерывное литье имеет ряд органических недостатков. Прежде всего сравнительно низкая скорость вытягивания, ибо воздушный промежуток между отливкой и стенками охлаждаемого кристаллизатора создает значительное тепловое сопротивление и не позволяет увеличить теплоотвод даже при интенсификации охлаждения. Один из перспективных путей увеличения скорости — применение инокуляторов, т. е. металлического порошка, вводимого в струю металла в процессе наполнения кристаллизатора. Легко понять, что тепло, идущее на нагрев и плавление частиц железного порошка, уже не может способствовать перегреву металла; оно не только ускоряет кристаллизацию, но и позволяет получить более мелкозернистую структуру, так как инородные частицы — инокуляторы играют роль дополнительных центров кристаллизации.

Однако на пути широкого внедрения этого перспективного способа имеется ряд трудностей: во-первых, тонкие металлические порошки еще дефицитны, хотя в настоящее время и известен ряд способов их массового производства в частности, распыление расплава, криогенное дробление и др. Во-вторых, введение порошка, который неминуемо содержит значительное количество газов, может ухудшить свойства металла. Наконец, до сих пор отсутствует способ ввода порошка в струю металла с высокой степенью усвоения, что способствовало бы полной механизации процесса. Преодоление этих трудностей — одна из важных задач изобретателей и рационализаторов.

Другой недостаток машин непрерывного и полунепрерывного литья — их сложность, материалоемкость, значительные габариты. Габариты машины особенно для непрерывного литья стали и других металлов с высокой температурой плавления определяются в известной мере длиной зоны вторичного охлаждения. Мож-

но ли их сократить, применив другую систему — систему охлаждения, допускающую передачу больших тепловых потоков? В этом плане весьма заманчивым представляется использование жидкометаллического охлаждения. Жидкие металлы как теплоносители обладают высокой теплопроводностью, которая лишь на 10—20% ниже теплопроводности соответствующего металла или сплава в твердом состоянии, высокой температурой кипения, что исключает опасность взрыва при прорыве металла, и другими ценными качествами. Уже известны первые установки нового типа, где теплоотвод осуществляется через жидкий сплав алюминия с цинком, в который погружен массивный, неохлаждаемый формообразователь — кристаллизатор.

К устройствам полунепрерывного литья относятся и центробежные машины, с помощью которых изготовляют водопроводные, канализационные трубы, втулки, гильзы и другие массовые отливки. Кристаллизация металла в поле центробежных сил имеет ряд особенностей: заготовки и детали, отлитые на центробежных машинах, обладают более высокой плотностью, менее развитой газовой пористостью; в связи с отсутствием литниковой системы увеличивается выход годного; затраты на изготовление стержней минимальны. Следует указать на возможность получения тонкостенных отливок даже из сплавов с низкой жидкотекучестью, а также на высокую производительность установок. Недостатки метода — трудность получения однородных по сечению отливок из сплавов, склонных к ликвации, неточность диаметра внутренней полости отливок, загрязнение этой полости ликватами и неметаллическими включениями, а также ограниченные размеры отливок, ибо вращение значительных масс не только требует затраты энергии, но и сопряжено с опасностью разрушения оборудования.

Фактор, ограничивающий скорость вращения, — сложность конструкции машин и опасность для обслуживающего персонала. По этим причинам весьма перспективно использование вращающегося электромагнитного поля, создаваемого статором. Здесь жидкий металл играет роль ротора асинхронного двигателя и вращается пропорционально напряженности поля. Метод позволяет получать втулки и трубы при отсутствии вращения формы. Отметим, что устройство для электромагнитного бесконтактного вращения расплава способно к реверсу

поля, что приводит к измельчению структуры и существенному улучшению свойств металла. Бесконтактное вращение расплава в металлической форме особенно эффективно можно использовать при изготовлении отливок вакуумным всасыванием, один из недостатков которого, как известно, — развитие транскристаллизации.

Под действием центробежных сил и в условиях направленного интенсивного теплоотвода фазы, выпадающие в процессе кристаллизации, разделяются. Например, при центрифугировании свинцовистых бронз можно выделить весь свинец в виде отдельного слоя. Разделение компонентов по плотности в процессе центрифугирования следует использовать для создания новых композиционных сплавов с особыми свойствами. Пример такой технологии — изготовление абразивного инструмента и других деталей системы металл—неметаллические материалы. При резком увеличении числа оборотов расплав затекает в поры слоя абразива и при последующем охлаждении прочно скрепляет их. Так получают многослойные отливки точных размеров. Кроме того, можно вводить в расплав упрочняющие добавки в виде более плотных интерметаллидов или тугоплавких металлов, создавать композиции из нерастворимых и не смешивающихся компонентов типа алюминий—свинец и т. п.

Большой интерес особенно для химического машиностроения представляет изготовление биметаллических отливок последовательной заливкой в форму двух металлов. Согласно технологии, предложенной советским ученым П. Е. Ляминым, второй слой металла заливается во вращающуюся форму, когда закончилась кристаллизация наружного слоя, а на свободной поверхности еще сохраняется небольшой слой расплава. При заливке «вторичного» металла происходит диффузия его и взаимодействие с первым расплавом и образуется промежуточный слой, обеспечивающий прочное соединение. Принцип позволяет соединять сплавы с различной плотностью, в том числе наносить тяжелые покрытия на сплав меньшей плотности.

До последнего времени применение этого перспективного способа, позволяющего экономить дефицитные материалы, было ограниченным, так как не существовало устройств для разделения биметаллических деталей в качестве шихтовых материалов.

Ныне положение изменилось, разработан так называемый криогенный способ разделки металлоотходов, при котором материал охлаждают до $-80-100^{\circ}\text{C}$ жидким азотом, т. е. до температуры, при которой практически все металлы полностью теряют пластичность и могут быть измельчены. Последующая магнитная сепарация измельченного материала позволяет отделить черные металлы от цветных, а также выделить неметаллиды.

Отметим, что из всех известных способов точного литья особое внимание следует уделить непрерывному и полунепрерывному формообразованию, так как в этом случае достигается наиболее высокая производительность, снижающая трудовые и материальные затраты, представляется возможность полной автоматизации процесса. Однако для решения этой задачи следует расширить номенклатуру изделий, которые можно отливать непрерывно прежде всего по форме и размерам, что, в свою очередь, требует изыскания принципиально новых методов формообразования точнолитых заготовок и деталей.

* * *

Заканчивая краткое описание методов получения точнолитых заготовок, отметим, что мы не ставили перед собой задачу в деталях описать все многообразие технологических приемов. Это с успехом сделано в книгах, перечисленных в списке литературы. Задачу брошюры мы видим в другом, а именно в том, чтобы привлечь внимание специалистов главным образом смежных отраслей техники к нерешенным проблемам литейного производства, технический уровень которого еще долго будет определять металлоемкость машиностроения и оказывать существенное влияние на производительность труда в системе металлургия—обработка металлов. Тем более, что резервы литейного производства еще далеко не исчерпаны особенно в части приложения последних достижений автоматизации, электроники, теплофизики, техники высоких давлений и др.

ЛИТЕРАТУРА

Вертман А. А., Самарин А. М. Свойства расплавов железа. М., «Наука», 1969.

Соколов Н. А. Литье в оболочковые формы. М., «Машиностроение», 1969.

Степанов Ю. А. Специальные виды литья. М., «Машиностроение», 1970.

Эльцуфин С. А. Литье повышенной точности. Л., «Машиностроение», 1969.

Белоусов А. К. Технологические режимы литья под давлением. М., «Машиностроение», 1967.

Ксенофонов Б. М. Литье методом вакуумного всасывания. М., «Машиностроение», 1967.

Патон Б. Е. и др. Электрошлаковая отливка и перспективы ее использования в литейном производстве. М., 1971.

Верте Л. А. Электромагнитная разливка и обработка жидкого металла. М., «Металлургия», 1967.

Морозов И. В. Литье под давлением. М., «Машиностроение», 1969.

Попова С. В., Бенделиани Н. А. Высокие давления. М., «Наука», 1974.

Свойства расплавленных металлов. Труды XVI совещания по теории литейных процессов. М., «Наука», 1974.

СОДЕРЖАНИЕ

О литейном деле	3
Направления научно-технического прогресса в литейном производстве	8
О формообразовании	12
Современные способы получения точных литых заготовок	19
Перспективные способы точного литья	45
Литература	62

11 коп.

Индекс 70067

