

УДК 669.715:66.078.5

Борисов Г. П., Семенченко А. И., Шейгам В. Ю., Шеневидько Л. К.

ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПОД РЕГУЛИРУЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ

В 1996 г. мировое производство отливок из алюминиевых сплавов впервые превысило объемы производства стального литья, а в настоящее время в ведущих промышленно развитых странах мира это превышение колеблется уже от 2,5 раз в США до 11 в Италии [1]. Основной причиной тенденции неуклонного за последние десятилетия возрастания доли алюминиевых сплавов в качестве конструкционного материала являются такие важные преимущества этих сплавов как высокие показатели удельной прочности, коррозионной стойкости, тепло- и электропроводности.

Как известно, отходы металла при получении готовых изделий из фасонных литых заготовок, как правило, в 1,5–2 раза, а суммарная энергоемкость в 2–3 раза ниже, чем при изготовлении их из проката и поковок [2]. Тем не менее, конструктора при разработке новых изделий часто предпочитают использование заготовок из деформированного металла из-за недостаточного уровня стабильности физико-механических и эксплуатационных характеристик литых деталей.

Традиционные методы повышения уровня и изотропии свойств металла отливок за счет их легирования и модифицирования приводят к усложнению состава сплавов, что обычно снижает их литейные свойства, в первую очередь, жидкотекучесть и трещиностойчивость. В результате преимущества литья как способа формирования заготовок значительно снижается.

Решение проблемы повышения уровня и стабильности физико-механических и эксплуатационных характеристик литого металла может быть достигнуто за счет приложения дополнительных внешних воздействий к металлу отливки в жидком и затвердевающем состояниях, среди которых давление занимает особое место по многообразию способов его применения и эффективности воздействия на формирование структуры и свойств литых изделий.

Поэтому в настоящее время в практике литейного производства применяется ряд методов литья с использованием давления – от вакуумной обработки расплава до литья под давлением и жидкой штамповки.

В этих способах литья ведущую роль в управлении процессами формирования отливки играет давление. Значительный диапазон освоенных в литейных процессах давлений предоставляет технологам возможность широкого выбора величины силового воздействия на металл формирующейся отливки. Как правило, для получения гарантированного эффекта уплотнения металла отливки под действием давления, предпочтение отдают использованию максимальных его значений.

Целью данной работы является анализ эффективности различных схем приложения давления при производстве отливок из алюминиевых сплавов и влияния давления на интенсивность теплообмена в системе отливка-форма.

Выполненный на основе данных [3–5] анализ ряда известных технологических схем применения давления показывает, что эффективность применения давления при изготовлении литых заготовок во многом определяется именно способом его создания и конкретным видом рабочей среды, которая используется для передачи давления к металлу затвердевающей отливки. Коэффициенты эффективности действия давления, представленные в виде отношения безразмерных величин относительного увеличения показателей предела прочности

на разрыв и относительного удлинения металла под действием приложенного к отливке давления к приросту относительной величины последнего, соотносятся примерно как $2,6 \cdot 10^{-4}$; $4,2 \cdot 10^{-2}$; $4,0 \cdot 10^{-1}$ и $7,0 \cdot 10^{-4}$; $1,9 \cdot 10^{-1}$; $2,7$ соответственно для таких основных специальных способов литья, как жидкая штамповка, автоклавное литье и литье под низким регулируемым давлением.

Причиной низкого значения коэффициента полезного действия поршневого давления является тот факт, что устранение газового зазора между затвердевшей коркой и прессформой происходит не просто за счет поджатия корки давлением внутренних слоев металла отливки, а за счет ее смятия, что требует значительно более высоких усилий прессования.

После устранения зазора дальнейшая деформация твердой корки направлена на компенсацию уменьшения объема при затвердевании внутренних слоев отливки. При этом реализуется суспензионный механизм питания отливки, требующий применения значительно более высоких давлений, чем при использовании фильтрационного механизма питания. Кроме этого, при поршневом методе приложения давления неизбежны большие потери усилий пресса на трение. В итоге, несмотря на значительную величину, поршневое давление может полностью компенсироваться сопротивлением твердой корочки при достижении ею достаточной толщины и в центральной части отливки могут оставаться области расплава, кристаллизация которого происходит при отсутствии избыточного давления, в то время как поршень продолжает передавать твердой корочке отливки исходное давление.

Таким образом, более высокий по сравнению с поршневым давлением коэффициент полезного действия, достигаемый при воздействии газового давления в условиях автоклавного литья на процесс затвердевания отливки, объясняется тем, что, если в первом случае давление к внутренним объемам затвердевающего в отливке металла с появлением наружной твердой корочки передается лишь при условии ее смятия движущимся поршнем, то во втором случае это достигается при осуществлении деформации той же корочки затвердевшего металла на изгиб, что требует (особенно при наличии плоских поверхностей, как, например, зеркало прибыли) гораздо меньших усилий, чем при пластической деформации затвердевшей корки, имеющей, например, в случае цилиндрической отливки форму полого цилиндра.

Наибольшие значения эффективных коэффициентов полезного действия достигается при наложении давления на затвердевающую отливку по технологической схеме литья под низким регулируемым давлением, обеспечивающей передачу силового воздействия с минимальными потерями через жидкую фазу непосредственно к фронту затвердевания металла. В данной технологии питание отливки осуществляется непосредственно расплавом из агрегата заливки, что позволяет также кардинально снизить непроизводительные расходы жидкого металла на литниково-питающие системы.

В выпускаемом оборудовании для литья под низким регулируемым давлением диапазон применяемых величин давления обычно не превышает $0,07$ МПа, в первую очередь, из-за условий обеспечения техники безопасности. И в ряде случаев, когда необходимо применение более высоких величин давления, данное преимущество метода оборачивается его недостатком, который может быть устранен применением разработанных авторами ряда технологических схем газовой и поршневой допрессовки расплава в условиях литья на данном оборудовании и кокильного литья.

Для реализации технологий литья под регулируемым давлением в промышленности ФТИМС НАН Украины совместно с Тираспольским заводом литейных машин организовали серийный выпуск гаммы универсальных литейных машин, обеспечивающих выпуск широкой номенклатуры фасонных отливок из алюминиевых сплавов, в том числе за счет применения форм с вертикальным разъемом и расширения диапазона величины давления, прилаемого к металлу.

Процесс затвердевания является наиболее ответственным этапом формирования отливок, а образующиеся в это время дефекты литого металла крайне сложно, дорого, и во многих случаях, вообще невозможно исправить. При этом такие основные параметры управлением этим процессом, как температура заливки расплава, начальная температура литейной формы, материал и толщина покрытия ее рабочей поверхности задаются в начальный момент и не могут целенаправленно изменяться по ходу его протекания. Разработанные во ФТИМС эффективные способы приложения давления к затвердевающей отливке дают возможность оперативно вмешиваться в ход процесса затвердевания и производить необходимые корректировки.

Практически все процессы, протекающие в объеме затвердевающей отливки, определяются интенсивностью охлаждения металла. Поэтому линейная скорость продвижения фронта затвердевания и градиент температур в интервале температур кристаллизации сплава рассматриваются в теории литейных процессов в качестве комплексных параметров управления процессами формирования структуры и свойств литых изделий.

При реально используемых величинах давления повышение скорости затвердевания отливок из алюминиевых сплавов осуществляется благодаря изменению интенсивности контактного теплообмена отливки с поверхностью формы.

Как известно, эффективный коэффициент теплоотдачи с поверхности отливки определяется суммарным термическим сопротивлением вещественной среды, находящейся в зазоре между отливкой и формой. Сразу после окончания процесса заливки на границе отливка – форма имеет место плотный контакт расплава с поверхностью литейной формы. В результате образование корки затвердевшего металла на поверхности отливки может наблюдаться еще до окончания процесса снятия перегрева расплава. После достижения металлом корки достаточной жесткости, чтобы противостоять гидростатическому давлению расплава, между отливкой и литейной формой образуется газовый зазор. В результате, в связи с тем, что теплопроводность воздуха на три порядка ниже теплопроводности металла, резко возрастает термическое сопротивление на границе отливка – форма, которое и становится лимитирующим звеном, определяющим интенсивность теплоотвода от поверхности затвердевающей отливки.

Как известно, при теплообмене лучеиспусканием удельный тепловой поток с поверхности отливки пропорционален разности температур поверхностей отливки и формы в четвертой степени.

Температурные интервалы затвердевания алюминиевых сплавов более чем вдвое ниже температур затвердевания чугуна и стали. Поэтому при литье алюминиевых сплавов теплообмен излучением в значительно меньшей степени, чем при затвердевании отливок из стали, чугуна и других высокотемпературных сплавов компенсирует снижение интенсивности теплообмена соприкосновением в результате образования газового зазора на границе отливка – форма.

На рис. 1 кривая 1 характеризует долю тепла, передаваемого теплопроводностью, а кривая 4 – излучением, в общем потоке тепла на границе алюминиевая отливка – форма.

Расчет производился для случая заливки алюминия при температуре расплава 727 °С в металлическую форму, предварительно подогретую до температуры 100 °С.

Для сравнения кривыми 2 и 3 представлены данные работы [6] о зависимости от величины газового зазора долей удельного теплового потока, передаваемых теплопроводностью и излучением в суммарном потоке тепла для случая заливки стали при температуре 1500 °С и температуре литейной формы 100 °С.

В интервале величин газового зазора до 0,1–0,2 мм, который характерен для фасонных отливок из алюминиевых сплавов, доля теплового потока, передаваемого излучением, в общем

потоке тепла с поверхности алюминиевой отливки не превышает 4–5 %, в то время как при изготовлении отливок из стали в этих условиях излучением передается до 30–50 % общего объема тепла, отдаваемого затвердевающей отливкой.

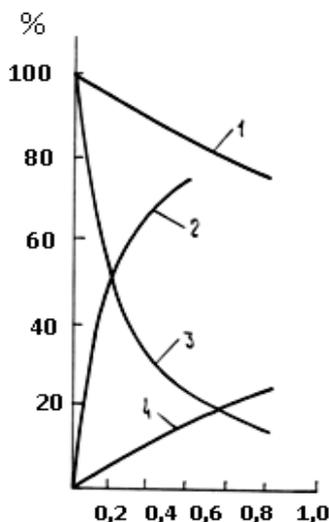


Рис. 1. Доля теплового потока, передаваемая соприкосновением (1, 3) и излучением (2, 4), в общем потоке тепла на границе отливка – форма, в зависимости от ширины газозазора: 1, 4 – отливки из алюминиевых сплавов; 2, 3 – стальные отливки [6]

Таким образом, образование и увеличение толщины газозазора между отливкой и формой гораздо более пагубно сказываются на суммарной интенсивности контактного теплообмена отливки с поверхностью литейной формы при изготовлении литых заготовок из алюминиевых сплавов. Поэтому приложение давления к металлу затвердевающей отливки будет наиболее эффективным именно при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов.

На рис. 2 показана экспериментально установленная зависимость влияния газозазора от давления, прикладываемого к затвердевающей отливке по технологической схеме литья под низким регулируемым давлением, на величину максимального значения коэффициента теплоотдачи на границе отливка – форма.

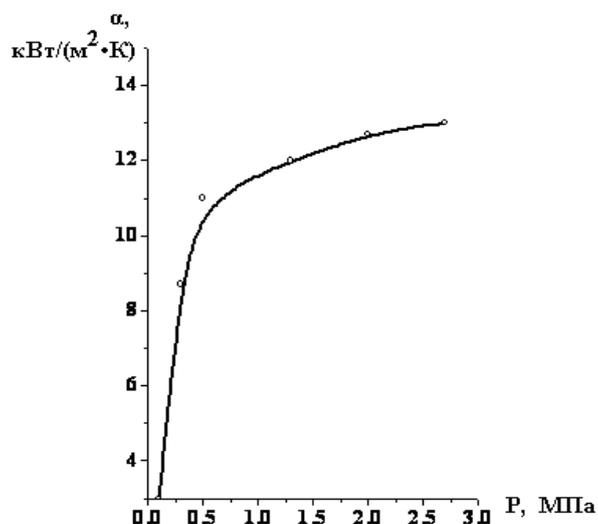


Рис. 2. Влияние давления на величину максимального значения коэффициента теплопередачи на границе отливка – форма при затвердевании цилиндрических отливок диаметром 58 мм из сплава АК9

Согласно полученным данным, наиболее значительный прирост интенсивности контактного теплообмена при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов имеет место в начальном диапазоне величин давления до 0,6–0,7 МПа. Тот факт, что указанный диапазон величин давления обеспечивается заводскими системами сжатого воздуха открывает возможности для широкого использования в производстве методов литья под регулируемым давлением.

На рис. 3, в свою очередь, представлены результаты численного расчета влияния интенсивности контактного теплообмена на кинетику затвердевания отливок из алюминиевых сплавов. Приложение давления позволяет не только увеличить продолжительность плотного контакта отливки с литейной формой, но также резко сокращает конечную величину образующегося газового зазора. В результате интенсивность контактного теплообмена отливки с литейной формой возрастает в продолжение всего времени ее охлаждения в полости формы.

При использовании достаточных величин давления обеспечивается полное устранение образования газового зазора на границе отливка – форма для отливок из алюминиевых сплавов. Методика расчета закона изменения величины давления в процессе затвердевания отливок различной толщины изложена в работе [7].

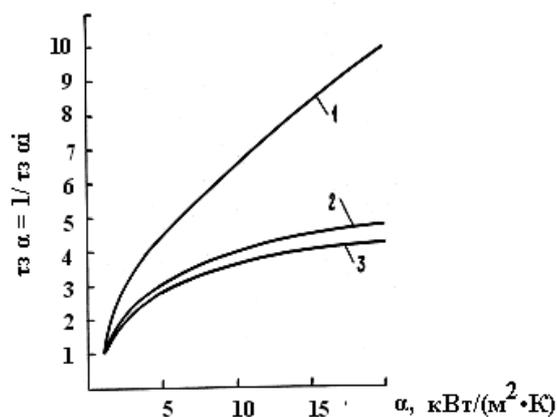


Рис. 3. Влияние интенсивности контактного теплообмена на границе отливка – форма на степень сокращения продолжительности затвердевания отливок типа пластина:

1, 2, 3 – толщина отливки 4, 16 и 30 мм соответственно

Приложение давления обеспечивает резкое повышение линейной скорости затвердевания отливок из алюминиевых сплавов. Так в случае приложения газового давления до 3,0 МПа по схеме литья под низким давлением минимальная величина линейной скорости затвердевания возрастает в 3–3,5 раза, а при литье под поршневым давлением минимальная скорость продвижения фронта затвердевания возрастает примерно в 4 и 5 раз при давлениях 20 и 30 МПа соответственно.

Кроме того, в результате приложения давления к затвердевающей отливке за счет устранения газового зазора и стабилизации термического сопротивления в контактной зоне обеспечивается повышение примерно в 2 раза эффективности использования заливки полости литейной формы низко перегретым расплавом для интенсификации процесса затвердевания отливок из алюминиевых сплавов. В свою очередь, степень сокращения продолжительности затвердевания отливок из алюминиевых сплавов при снижении начальной температуры формы в условиях обеспечения плотного контакта отливки с поверхностью формы возрастает примерно в полтора раза.

Повышение скорости затвердевания наряду с кардинальным решением проблемы устранения при литье под регулируемым давлением газоусадочной пористости металла литых заготовок [3] обеспечивают увеличение его прочностных характеристик на 10–20 %

и относительного удлинения – в 1,5–2 раза, а также повышение ряда эксплуатационных характеристик до уровня свойств деформируемого металла при одновременном снижении расхода жидкого металла.

На рис. 3 кривая 1 описывает влияние интенсивности контактного теплообмена на границе отливка – форма на кинетику затвердевания отливок толщиной 4 мм, которые обычно изготавливаются на машинах литья под давлением. В этих условиях используются достаточно большие давления, и дополнительная интенсификация теплоотдачи с поверхности отливки может быть достигнута за счет уменьшения теплосодержания отливки при снижении температуры заливки расплава, в том числе при литье частично затвердевших сплавов, а также за счет увеличения площади фактического контакта отливки с формой [7].

ВЫВОДЫ

Применение давления наиболее эффективно при литье алюминиевых сплавов, так как образование газового зазора на границе отливка – форма в этом случае значительно пагубнее сказывается на интенсивности контактного теплообмена, чем при литье высокотемпературных сплавов.

Наибольшие значения эффективных коэффициентов полезного действия давления достигаются при наложении его по схеме литья под низким регулируемым давлением, обеспечивающей передачу силового воздействия с минимальными потерями через жидкую фазу непосредственно к фронту затвердевания металла.

При совместном воздействии давления, изменения начальной температуры литейной формы и температуры заливки расплава за счет устранения газового зазора на границе отливка – форма в результате приложения давления и соответствующей стабилизации термического сопротивления в контактной зоне степень ускорения процесса затвердевания отливок из алюминиевых сплавов при снижении начальной температуры формы возрастает примерно в 1,5 раза, а эффективность влияния изменения температуры заливки расплава на кинетику затвердевшего металла повышается примерно вдвое в сравнении с литьем в атмосферных условиях.

Литье под регулируемым давлением обеспечивает высокий гарантированный уровень качества отливок при одновременном сокращении материальных, энергетических и трудовых затрат. Линейная скорость затвердевания отливок повышается в 3–5 раз, на 10–20 % возрастает прочность и в 1,5–2 раза – пластичность литого металла. На 200–400 кг снижаются непроизводительные затраты жидкого металла на производстве 1 т литья, экономится 200–300 кВт·час электроэнергии, в 1,5–2 раза уменьшаются безвозвратные потери металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гини Э. Ч. *Литейное производство в XX веке. Анализ итогов* / Э. Ч. Гини // *Литейное производство*. – 2002. – № 7. – С. 6–8.
2. Шестопа В. М. *Литейное производство. Некоторые итоги и задачи* / В. М. Шестопа // *Литейное производство*. – 1981. – № 1. – С. 1–3.
3. Борисов Г. П. *О роли давления в формировании высококачественных отливок* / Г. П. Борисов, А. И. Семенченко // *Литейное производство*. – 2009. – № 5. – С. 25–33.
4. Батышев А. И. *Кристаллизация металлов и сплавов под давлением* / А. И. Батышев. – М. : Металлургия, 1990. – 144 с.
5. Белоусов Н. И. *Затвердевание отливок из цветных сплавов в условиях приложения давления* / Н. И. Белоусов // *Затвердевание металла*. – М. : Машигиз, 1958. – С. 176–214.
6. Вейник А. И. *Теория затвердевания отливки* / А. И. Вейник. – М. : Машигиз, 1960 – 435 с.
7. *Разработка научных основ повышения качества и эффективности производства отливок из алюминиевых сплавов путем водородной обработки расплава и литья под давлением : Отчет о НИИР (заключительный) ФТИМС НАН Украины ; № ГР 0101U004577*. – Киев, 2004. – 378 с.