



Prospects of the method of directional- successive crystallization at production of shaped castings of cast irons of different grades are shown.

А. П. МЕЛЬНИКОВ, НП РУП «Институт БелНИИлит»

УДК 621.74

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВОК ИЗ ВЫСОКОПРОЧНЫХ И СПЕЦИАЛЬНЫХ ЧУГУНОВ

Надежность и долговечность ответственных изделий машин и механизмов в современном машиностроении может быть обеспечена путем применения в их конструкции специальных материалов. Литые детали из чугунов различных видов находят все большее применение в силу их высокой технологичности и относительно низкой себестоимости.

В последние годы конструкторы все чаще заменяют стальное литье, штамповки, поковки, отливки из ковкого и серого чугуна отливками из высокопрочного и специальных чугунов.

Особенно широкое распространение для производства литых деталей, работающих в условиях действия динамических нагрузок, получил высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ЧШГ), характеризующийся сочетанием высоких технологических, физико-механических и эксплуатационных характеристик. В сравнении со сталью ЧШГ обладает более высокими значениями модуля упругости, достигающими $(180-200) \cdot 10^3$ МПа, циклической вязкости, износостойкости и соотношением предела текучести к пределу прочности при растяжении, равном 0,70–0,85 (для стали 0,5–0,6). Высокая жидкотекучесть ЧШГ позволяет использовать его для получения сложных разностенных изделий. Это в свою очередь обеспечивает возможность оптимизации конструкции отливки, снижения толщины ее стенок и массы, повышения жесткости конструкции и ее работоспособности.

Именно благодаря этому ведущие автомобильные фирмы США, Великобритании, Японии и Германии используют в двигателях, системе подвески (рессорные подвесы, детали тормозных систем, поворотные кулаки), узлах трансмиссии (фрикционные диски, корпуса дифференциала, задние оси, колесные ступицы) автомобиля детали из ЧШГ в значительных объемах.

Доля высокопрочного чугуна (%), потребляемого автомобилестроением, приведена ниже.

США	Япония	Франция	Германия	Россия	Польша
45–50	30–35	40–45	37–45	около 15	13–15

В сельскохозяйственном машиностроении ЧШГ применяют для производства деталей тракторов, плуговых лемехов, кронштейнов, зажимных рычагов, шкивов, картеров заднего моста и т.д.

Вместе с тем, несмотря на то что общие закономерности влияния легирующих элементов на процессы графитизации чугуна известны, существует целый ряд спорных моментов, касающихся механизма и степени влияния каждого элемента на структуру чугуна (размеры и распределение графита, соотношение феррита и перлита, дисперсность перлита).

Известно, что для образования шаровидной формы графита в структуре чугуна требуется его переохлаждение в процессе кристаллизации. Для немодифицированного чугуна требуемое переохлаждение может достигать сотен градусов, для обеспечения которого нужны высокие скорости охлаждения. В этом случае вместо сфероидизации графита происходит зачастую отбел чугуна. Модифицирование же чугуна сфероидизирующими добавками резко снижает необходимое для образования шаровидной формы графита переохлаждение вплоть до нескольких градусов (при высоком содержании модификатора). Экономически важно подобрать такой минимальный расход модификатора, при котором гарантированно получается ЧШГ при переохлаждении, которое легко обеспечить технически на практике без отбела. Оптимизация составов высокопрочных чугунов и технологических процессов их производства обеспечивает получение ответственных литых изделий со стабильными физико-механическими и эксплуатационными свойствами при относительно невысо-

ком расходе энергии, модифицирующих и легирующих добавок, шихтовых и вспомогательных материалов. Многочисленные исследования по данным вопросам приведены в [1].

Другой важной задачей при производстве литых изделий является обеспечение высокой плотности и однородности отливок по всему объему, предотвращение образования в них газоусадочных дефектов.

Кристаллизация отливки – крайне сложный процесс в силу многокомпонентности системы, поэтому затвердевание отливки нельзя рассматривать только как простой отвод теплоты от расплава. В процессе кристаллизации одновременно протекают как процессы перераспределения растворимых компонентов и примесей сплава между твердой и жидкой фазами, так и усадочные процессы в затвердевшей части отливки. В значительной степени все это и служит основой для характера формирования кристаллического строения отливки, развития неоднородности его химического состава по сечению и предопределяет возможность появления усадочных, газоусадочных дефектов и трещин.

Эффективным и доступным способом решения задачи получения отливок с плотной и однородной структурой может служить направленное затвердевание отливки в процессе кристаллизации. Для классической схемы получения отливок разработаны принципы конструирования отливок и литниково-питающих систем, технологические подходы к обеспечению правильного питания отливок.

При организации питания отливки важно обеспечить направленность затвердевания, что возможно, если толщина стенки отливки по направлению к прибыли равномерно увеличивается. Метод вписанных окружностей или шаров А. Геверса нашел широкое применение для анализа конфигурации отливки при ее заполнении и кристаллизации в стационарном положении (без изменения положения формы и отливки в процессе заполнения и кристаллизации). Он заключается в том, что окружность, вписанная в самую тонкую часть сечения отливки, должна беспрепятственно выкатываться по направлению к прибыли (рис. 1). Если эти окружности (или шары) можно беспрепятственно выкатить через стенки отливки в прибыль, то направленность затвердевания будет обеспечена и прибыль позволит осуществить питание отливки (рис. 1, б).

Участки, где имеются сужения сечения отливки, не обеспечивают направленность ее затвердевания (рис. 1, а). За такими сужениями будут находиться зоны отливки, которые не могут быть про-

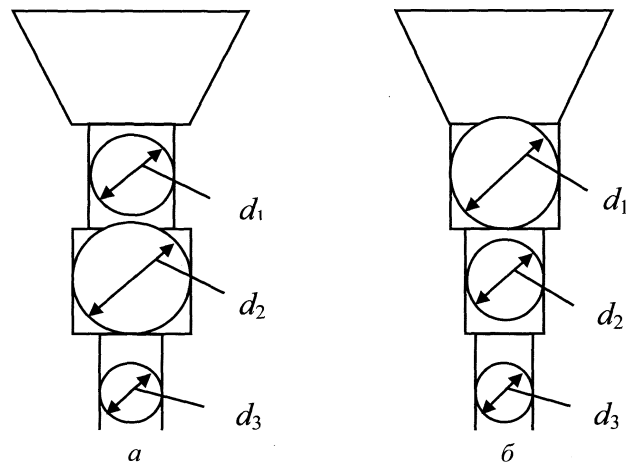


Рис. 1. Конструкции стенок отливок: а – $d_1 < d_2 < d_3$. Не обеспечивается направленность кристаллизации; б – $d_1 > d_2 > d_3$. Обеспечивается направленность кристаллизации

питаны из прибыли и в итоге будут содержать литейные дефекты.

Прибыли, установленные в верхних частях стенок, рекомендуется рассчитывать по выражению [2]:

$$\frac{25(4P+1)}{S} = \frac{PD}{EW} - \frac{1,275}{D^2}, \quad (1)$$

где P – отношение высоты прибыли к ее диаметру; S и W – соответственно площадь поверхности и объем части отливки, питаемой прибылью; D – диаметр прибыли; E – относительная объемная усадка металла, величину которой можно определить из соотношений с углеродным эквивалентом [1].

Принимаем во внимание, что для данной конкретной отливки параметры S , W и E являются постоянными, а параметры P и D взаимосвязаны через необходимый объем прибыли (допустим, что форма прибыли – цилиндр) $V = \frac{\pi}{4}PD^3$. В результате ряда последовательных математических преобразований объем прибыли, необходимой для питания зоны объемом W стационарной отливки, можно представить следующим образом:

$$V = \frac{1,275}{K_2 - K_1}, \quad (2)$$

где $K_2 = f\left(\frac{1}{EW}\right)$; $K_1 = f(S)$.

Выбор конфигурации и размеров прибылей, мест подвода расплава в полость формы, скорость заполнения формы расплавом и т. д. – известные технологические средства, позволяющие обеспечить правильное питание и формирование отливки. При этом важным с точки зрения экономии энергии и материальных ресурсов является умень-

шение объема литниково-питающей системы до минимально возможных размеров (на практике выход годного при литье сложных ответственных отливок по классической технологии редко поднимается выше 60%).

Известно, что качество отливок, полученных специальными способами литья с интенсивным теплообменом, гораздо выше, чем отливок, изгото-

товленных такими традиционными способами, как, например, литье в песчаные формы. Одним из наиболее производительных и экономически эффективных методов изготовления профильных протяженных отливок является метод горизонтального непрерывного литья [3].

Однако при производстве сложного фасонного литья такой метод не может быть применен. Для

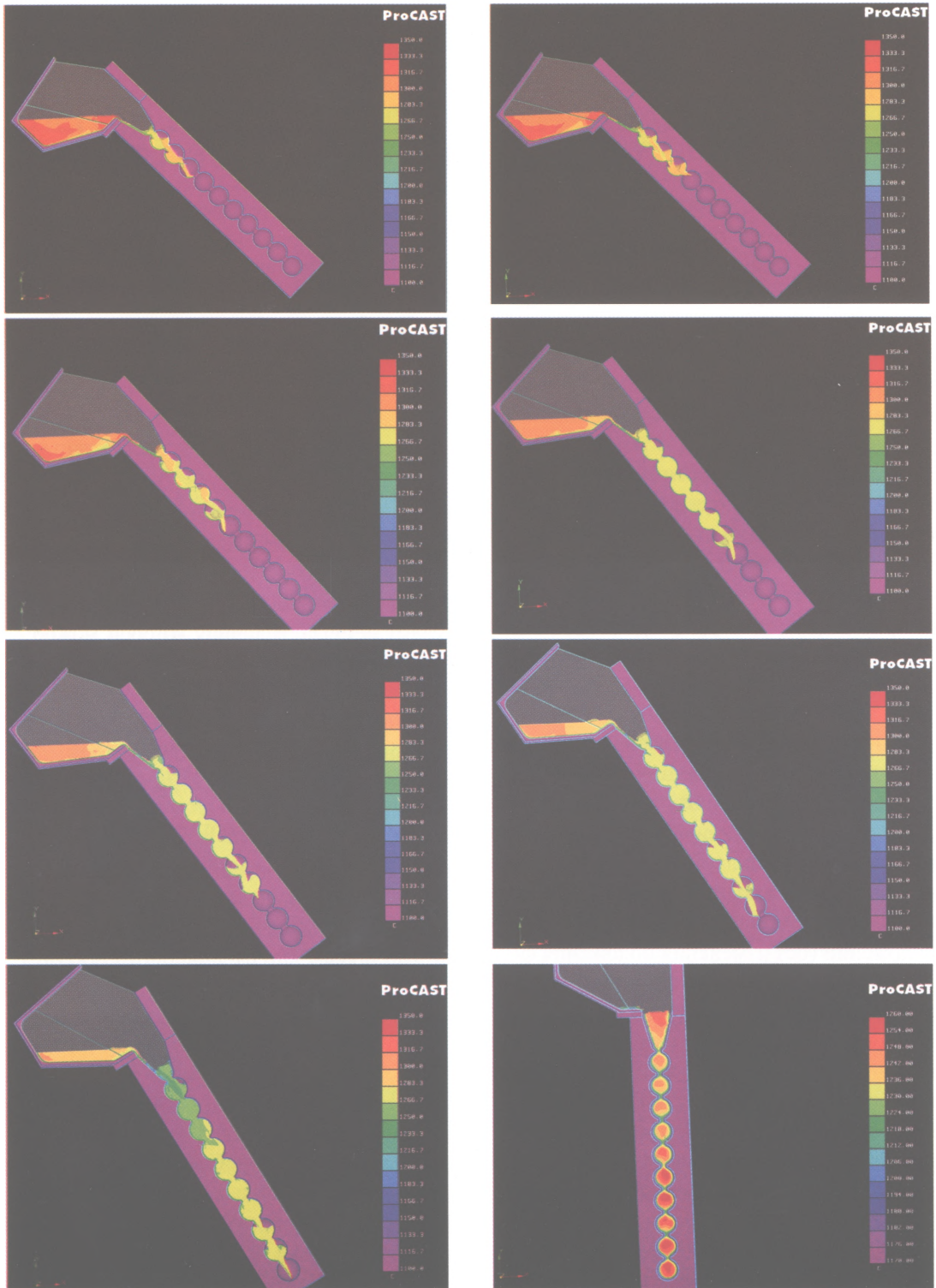


Рис. 2. Моделирование процесса заполнения кокиля при литье методом направленно-последовательной кристаллизации шаров из чугуна

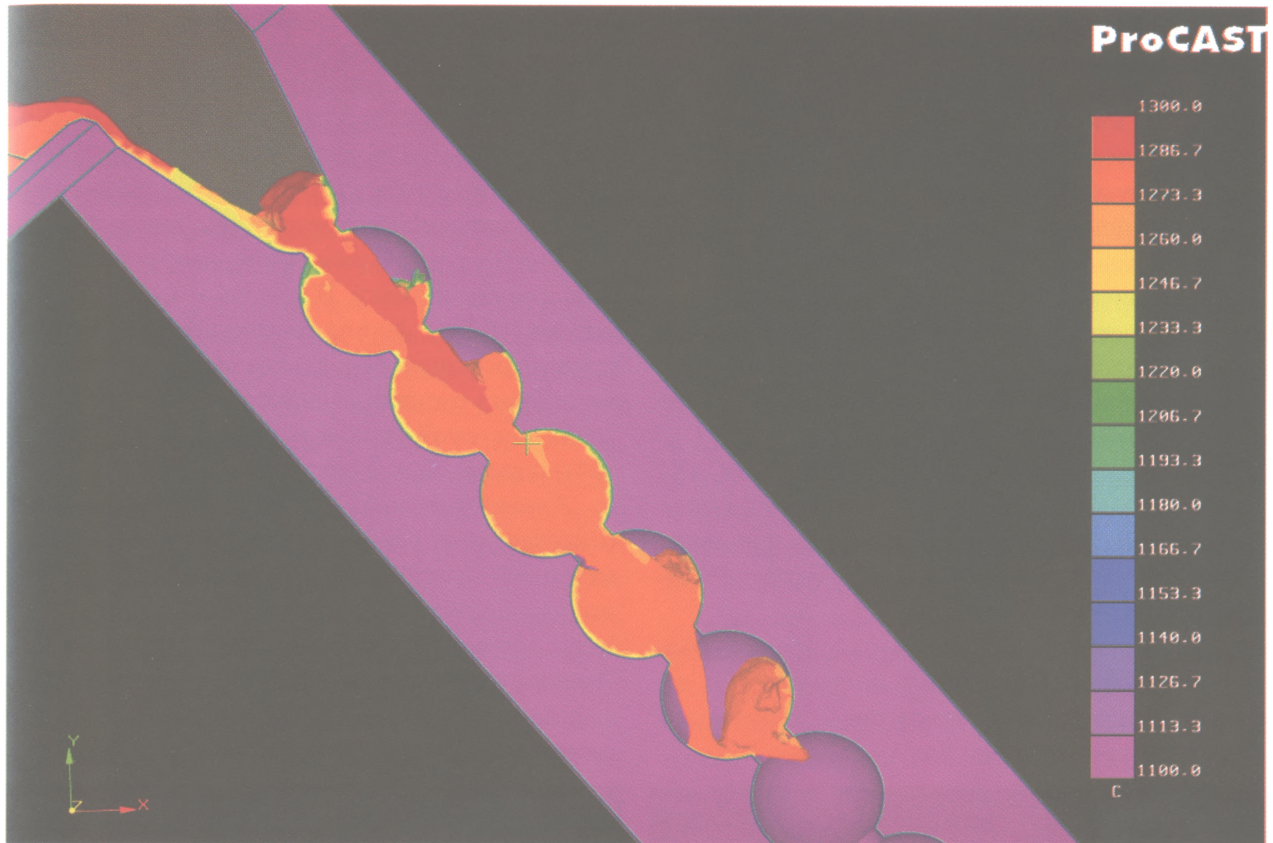


Рис. 3. Промежуточная стадия заполнения формы расплавом

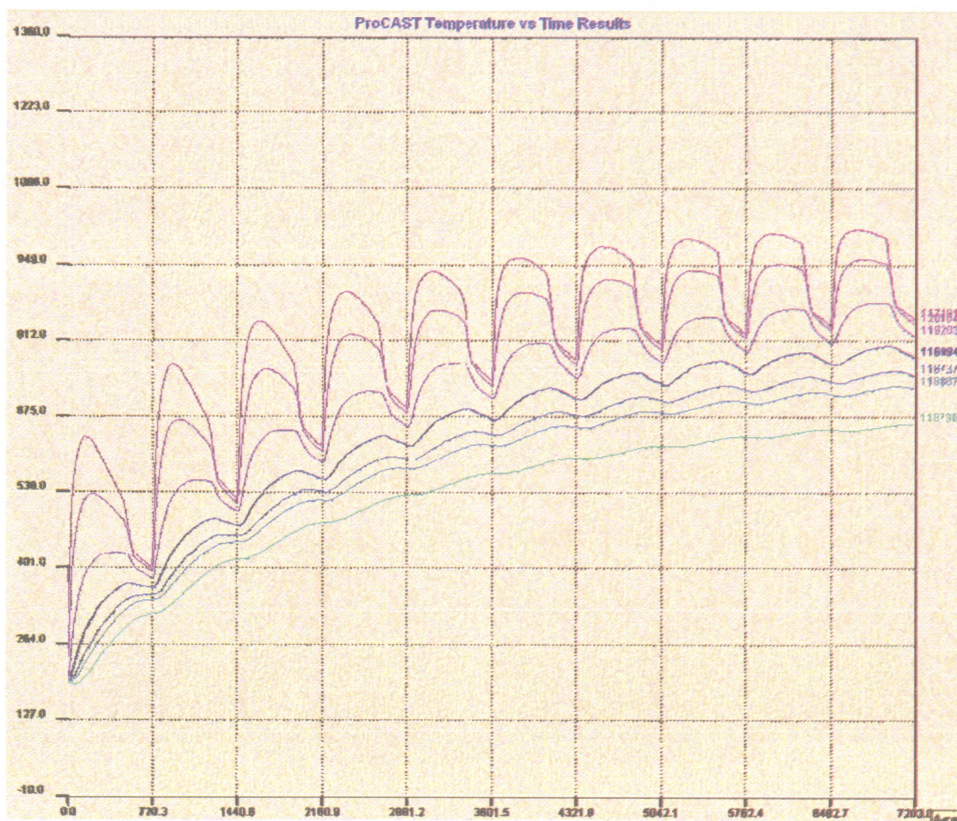


Рис. 4. Изменение температуры различных элементов кокиля в зависимости от числа заливок

данного случая разработан метод направленно-последовательной кристаллизации [4].

Метод направленно-последовательной кристаллизации заключается в заливке расплава в последовательно расположенные отливки и постоянной регулируемой подпитке кристаллизующейся отливки порциями свежего расплава. Причем заливка происходит из чаши при повороте формы из горизонтального положения в вертикальное. Варьируя скоростью поворота и температурным режимом комплекса «форма–расплав», можно в широком диапазоне влиять на параметры заполнения формы и кристаллизации.

Компьютерное моделирование в среде ProCAST процесса заполнения кокиля в случае реализации технологии направленно-последовательной кристаллизации (рис. 2) показало, что заполнение формы происходит ламинарно.

Причем, как видно из рис. 3, заполнение полости каждого шара происходит независимо от заполнения других шаров примерно с одинаковой скоростью для каждого из них.

На промежуточной стадии заполнения формы (рис. 3) уже в процессе заполнения начинается кристаллизация удаленных частей отливки с одновременной подпиткой от потока движущегося расплава.

Как видно из модели, наиболее горячая часть потока находится в верхней части формы с постепенным снижением температуры книзу. Оба этих явления и служат основой для направленной кристаллизации отливки. В конечном итоге, ламинарное заполнение формы совместно с направленной кристаллизацией обеспечивают получение большого куста отливок шаров с минимальной литниковой системой (выход годного составляет около 85%) и высокой плотностью литья.

Анализ тепловых режимов работы кокильной оснастки при реализации направленно-последовательной кристаллизации свидетельствует о том, что уже примерно на 7–10-м цикле заливки происходит температурная стабилизация кокиля (рис. 4). Именно после этого в наибольшей степени реализуются все преимущества направленно-последовательной кристаллизации, так как происходит

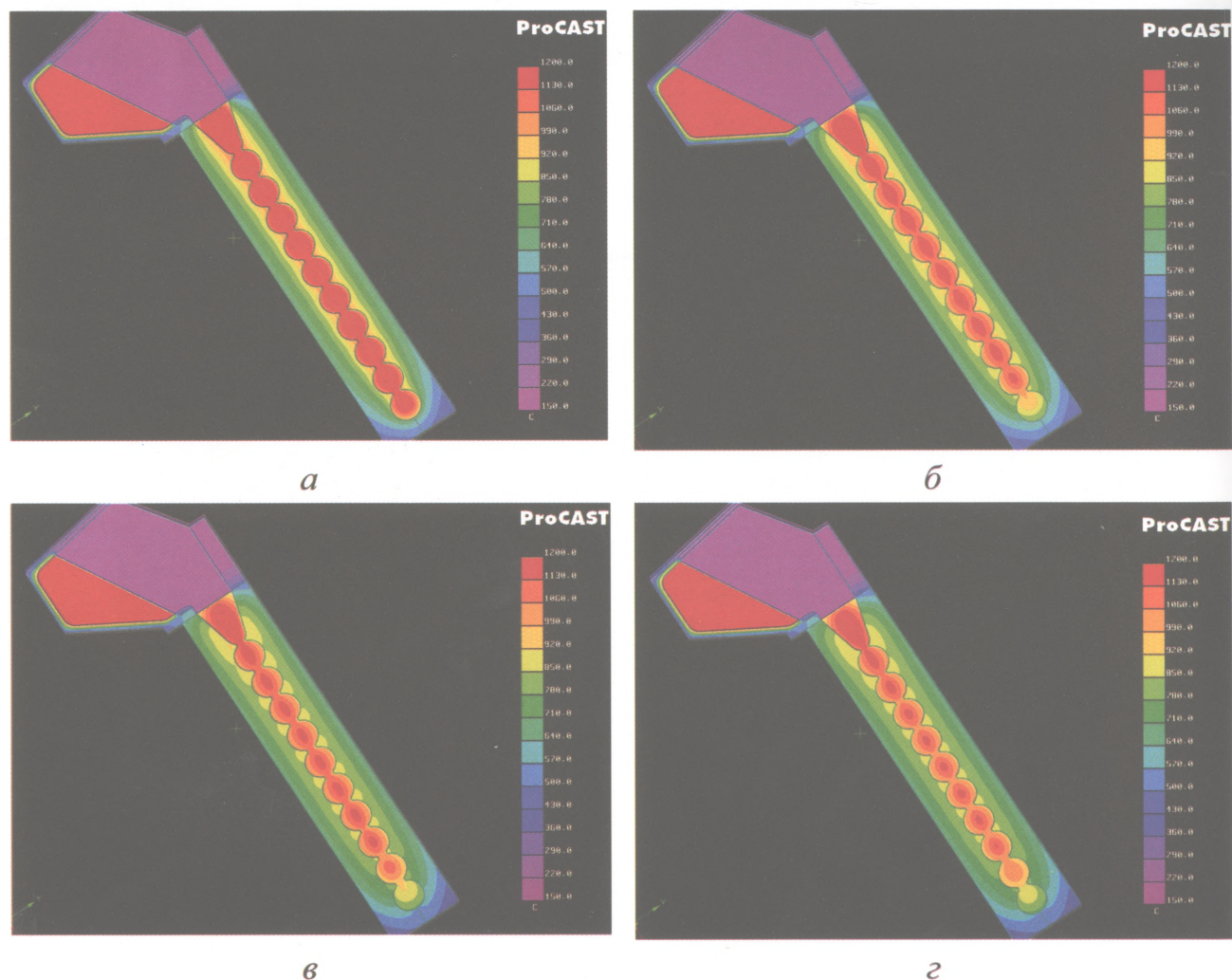


Рис. 5. Моделирование в среде ProCAST процесса кристаллизации и охлаждения отливки после заполнения формы расплавом

прогрев внутренних выступающих элементов кокиля, что существенно облегчает не только процесс заполнения полости формы, но и обеспечения направленной кристаллизации.

Моделирование в среде ProCAST процесса кристаллизации и охлаждения отливки после заполнения формы расплавом (рис. 5) позволяет четко проследить процесс кристаллизации. Сразу после заполнения формы металл частично находится в расплавленном состоянии. Начинается кристаллизация удаленных элементов отливок. Идет интенсивный прогрев формы, особенно внутренней поверхности и выступающих частей.

По картине распределения температуры в отливке видно, как обеспечивается подпитка кристаллизующихся шаров и протекание процесса направленной кристаллизации.

Были проведены исследования технологических параметров данного метода получения отливок из чугуна на примере литья мелющих шаров. Причем для усложнения задачи и более глубокого понимания процессов направленно-последовательной кристаллизации в качестве объекта исследований были выбраны шары диаметром 120 мм. Известно, что шар, как отливка, является весьма проблематичным продуктом производства в силу ряда технологических трудностей: проблема питания

кристаллизующейся отливки, проблема обеспечения высокого выхода годного, проблема размещения и последующего отделения элементов литниково-питающей системы и т.п.

Для производства отливок чугунных шаров используют преимущественно стационарные кокиля со сложной литниковой системой. Причем при таком технологическом подходе отливки умеренного качества получают для шаров диаметром до 60 мм с выходом годного литья не выше 60–65%.

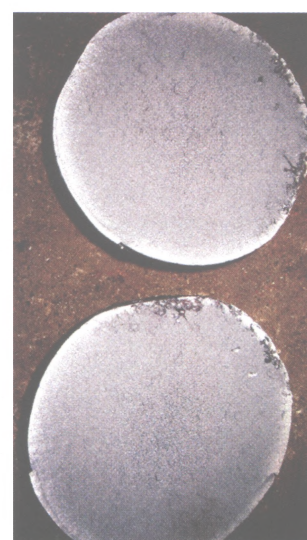
В результате была создана установка (рис. 6, а) для реализации метода направленно-последовательной кристаллизации в условиях действующего производства. Получаемые отливки шаров диаметром 120 мм отличаются высокой плотностью и качеством (рис. 6, б). Выход годного литья при этом достигает 80–90%.

Для случая направленно-последовательной кристаллизации требуемый объем прибыли значительно меньше, что и является главным фактором повышенного уровня выхода годного. В результате для метода направленно-последовательной кристаллизации формулу (2) можно представить в виде

$$V = \frac{1,275K_3}{K_2 - K_1}, \quad (3)$$



а



б

Рис. 6. Реализация метода направленно-последовательной кристаллизации: а – установка; б – макроструктура материала по сечению шара

где K_3 – коэффициент способа заполнения и кристаллизации.

Для случая направленно-последовательной кристаллизации значение K_3 находится в интервале $K_3 = 0-1$.

При достижении K_3 значения $K_3 = 1$ условия заполнения и кристаллизации формы приближа-

ются к стационарной форме и формула (3) приобретает вид (2).

Таким образом, можно говорить о широкой перспективе метода направленно-последовательной кристаллизации при производстве фасонного литья из чугунов различных марок в силу большого потенциала материало- и энергосбережения данного процесса.

Литература

1. Карпенко М. И., Мельников А. П. Металлы, сплавы и композиции. Мн.: НИРУП Белавтотракторостроение, 2004.
2. Воронин Ю. Ф., Камаев В. А. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы. М.: Машиностроение-1, 2005.
3. Мельников А. П., Карпенко М. И., Марукович Е. И. Технология и оборудование непрерывного литья заготовок // Обзорная информация. Мн., 1992.
4. Садох М. А., Мельников А. П., Краев Б. А. и др. Метод самозаполнения при производстве алюминиевых отливок // Литье и металлургия. 2004. № 2. С.153–155.