



*Possibilities of control over structure and properties of cast metals at different stages of casting conversion by means of dynamic bursting loading are examined*

*А. А. АНДРУШЕВИЧ, НИИ импульсных процессов с опытным производством*

## УПРАВЛЕНИЕ СТРУКТУРОЙ ЛИТЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

УДК 621.74:669.71

Существенным отличием литейной технологии от других методов обработки металлов и их сплавов является изменение при ее реализации агрегатного состояния исходных материалов. В связи с этим литейно-металлургический передел имеет ряд преимуществ, связанных с уникальной возможностью двукратной реализации фазового превращения: расплавление шихты и последующее затвердевание металла в форме.

Важнейшая задача литейного производства — направленное управление структурой и свойствами литой заготовки на всех стадиях получения отливки, основанное на выборе оптимального технологического процесса и его параметров. На современном этапе развития, характеризующимся повышением качества продукции при значительном снижении металлоемкости и энергетических затрат, а также уменьшением загрязнения окружающей среды, основное значение приобретает разработка приоритетных научно-технических направлений, решающих комплексные задачи с привлечением специалистов, работающих в области металловедения, металлургии, литья, термической, деформационной и механической обработки металлов, заготовок и готовых изделий. К таким направлениям относятся методы управления структурой и свойствами на основе применения явления структурной наследственности сплавов [1]. При разработке прогрессивных технологических процессов получения литых материалов и изделий необходим качественный и количественный учет закономерностей структурной наследственности на различных стадиях, которые включают в себя подготовку шихтовых материалов, плавку, внепечную обработку расплава и затвердевание отливки [1, 2].

Качество литого металла главным образом определяется его структурой, которой можно управлять различными методами химических и физических воздействий. В работе [2] предложена классификация методов управления литой структурой по технологическому принципу, позволяющая определить, на какой стадии процесса, при каких технологических параметрах, посредством каких

материалов и оборудования можно обеспечить получение наилучших результатов. Вследствие термодинамической неустойчивости большинства методов управления литой структурой, возможности протекания возвратных, а также неконтролируемых процессов необходимо согласование длительности воздействий с реальным технологическим циклом и его стадийностью. Особенно это важно для быстро протекающих динамических воздействий, например при импульсном взрывном нагружении, которое характеризуется высокими значениями температур и давлений, на порядок превышающими аналогичные величины в других видах обработки материалов [3].

Процессы динамического нагружения литых металлов энергией взрыва изучены недостаточно, несмотря на большую вероятность получения неоднозначных результатов, связанных с вводом и сохранением изменений в структуре на различных уровнях [4]. Возникающие импульсные нагрузки характеризуются достижением значительных давлений в диапазоне сверхмалых временных интервалов и существенным ростом температуры. В результате происходит локальная перестройка структуры по объему металла, обусловленная накоплением структурной информации в виде дефектов кристаллического строения. Распределение структуры по скоростям и амплитудам нагружения имеет очень широкий диапазон. При импульсной обработке могут протекать фазовые превращения, изменения растворимости легирующих элементов, а также упорядочение структуры [3, 5]. Все это приводит к динамическому упрочнению, граница которого определяется расположением фронта ударной волны в материале [6]. Дефекты структуры, вносимые динамическим нагружением, являются устойчивыми в условиях термических воздействий [7]. Поэтому исследование перестройки структуры литых металлов, подвергнутых импульсному взрывному нагружению, является сложной и многогранной проблемой.

Основные методы управления структурой в системе “шихта—расплав—отливка” с учетом структурной наследственности рассмотрены в ра-

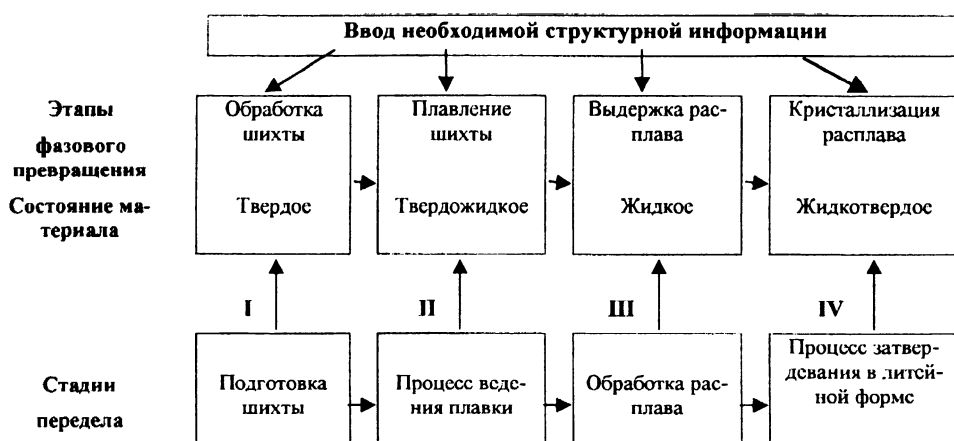


Рис. 1. Методы управления литой структурой в системе "шихта—расплав—отливка" на различных стадиях литейно-металлургического передела

боте [8], где показаны широкие перспективы использования предварительно заложенной в материал структурной информации.

Обобщение работ [2, 8] позволяет предложить развернутую схему управления структурой литых материалов на разных стадиях литейно-металлургического передела (рис. 1) и рассмотреть в общем виде возможность введения структурной информации в процесс получения литой заготовки.

Ввод необходимой структурной информации на первой стадии (I) осуществляется специальными способами обработки и разделки шихтовых материалов (первичные материалы, лигатуры, отходы собственного производства, вторичные сплавы) с целью обеспечения необходимого химического состава, структуры и свойств получаемых сплавов. Наиболее управляемая характеристика — структура металла, которая легко поддается изменению на данной стадии путем ввода в шихту, например, лигатур, добавок со специальной структурой, временной выдержки шихты, обработкой деформацией, термической обработкой и другими способами физического воздействия [2, 8].

На второй стадии (II) выбором оптимальных режимов плавки шихты (скорости нагрева и плавления, температуры перегрева над температурой ликвидуса, видом атмосферы) достигается сохранение заложенной структурной информации. При переходе из кристаллического твердого состояния в жидкое в обычных квазистатических условиях принято считать, что существенной перестройки структуры металлов ближнего порядка, например для Al, Fe, Ni, Cu, Mg, не происходит, так как коэффициенты упаковки атомов этих металлов в жидком состоянии достаточно значительны. В связи с этим для данных металлов должен сохраняться эффект наследования структуры кристалла при расплавлении [8].

Третья стадия (III) — рафинирующе-модифицирующая обработка расплавов флюсами, лигатурами, продувкой газовыми реагентами, выдержкой при температуре заливки и др., т.е. воздей-

ствием химическими способами, направлена на снижение или удаление вредных примесей, улучшение и фиксирование макро- и микроструктуры, обеспечивающая необходимый уровень свойств металлов.

На четвертой стадии (IV) затвердевания отливки в литейной форме в зависимости от условий заливки и способов литья достигается получение литой заготовки заданной конфигурации с требуемым уровнем механических и служебных свойств. Скорость кристаллизации и параметры литья оказывают существенное влияние на качество и уровень свойств отливки [2].

В последующих переделах литых полуфабрикатов и изделий также могут сохраняться эффекты структурной наследственности в твердом состоянии, которые были введены еще на стадиях литейного передела. В условиях реального производства при использовании различных шихтовых материалов структурная информация от них к отливке в то же время передается не более чем на 20—50% [8]. Анализ, проведенный В. И. Никитиным по выявлению наиболее благоприятных технологических условий сохранения и передачи структурной информации из шихтовых материалов в отливку [8], позволил выделить следующие: минимальную продолжительность хранения шихты после ее специальной обработки; применение режимов плавки измельченной (деформированной) шихты с наименьшими скоростями плавления; нагрев расплавов не выше оптимальных технологических температур заливки; обработку расплавов минимально возможным количеством рафинирующих и модифицирующих реагентов; кристаллизацию заготовок и слитков с повышенными скоростями охлаждения; использование сокращенных режимов термической обработки.

Используя предложенный методологический подход применительно к специальным способам обработки материалов, следует обратить внимание на возможность динамического взрывного нагружения только на отдельных стадиях передела:

специальная обработка шихтовых материалов, воздействие импульсной обработки на расплав, а также готовую литую заготовку с дополнительным вводом структурной информации путем перестройки структуры. Наложение динамических нагрузок на различных стадиях производства литых изделий позволяет достигнуть эффекта измельчения структуры, повысить степень ее однородности, увеличить растворимость легирующих элементов и присутствующих примесей, тем самым может привести к заметному повышению физико-механических и эксплуатационных свойств отливок [4].

Наиболее эффективной представляется твердофазная комбинированная обработка шихты энергией взрыва, при которой наряду со значительным мгновенным разогревом материала в локальных объемах он подвергается большим силовым нагрузкам вплоть до разрушения [3, 4]. В соответствии с классификацией способов обработки шихтовых материалов по агрегатному состоянию, рассмотренной в работе [8], предлагаемый способ может быть отнесен к специальной ударно-волновой деформационно-термической обработке, отличающейся сверхвысокими скоростью возникновения и величинами развиваемых давлений.

Своеобразие процесса динамического нагружения металлов и сплавов заключается в том, что упрочняемый материал отделен от неупрочненного тонким слоем, представляющим фронт ударной волны [6]. Переход через фронт вызывает сильные деформации кристаллической решетки и большие напряжения сдвига, которые порождают дислокации и другие дефекты структур. Плотность дислокаций и твердость после взрывного воздействия возрастают более интенсивно, чем после традиционных методов деформационной обработки давлением. Формирование структуры и, как следствие, свойств происходит в условиях одновременного действия «деформационного» и «термического» факторов, что обеспечивает получение специфичных микро- и субструктур, отличающихся от достигаемых в квазистатических условиях.

Понятие эффекта наследственности предполагает сохранение исходной дефектности структуры металла при последующей обработке, что позволяет предположить значительное изменение свойств литых изделий и полуфабрикатов в результате дополнительного наложения таких воздействий [8].

Исследование динамического высокоскоростного нагружения модельного бинарного сплава Al — 20% Si, полученного литьем в кокиль, в диапазоне давлений 4,5—17,5 ГПа и длительности импульса 120—140 мкс подтвердило изменение структуры и свойств в зависимости от силы взрывного нагружения и расстояния до точки подрыва по высоте отливки. Специфические особенности последствий импульсной обработки сводятся к измельчению и диспергированию избыточных фаз и первичных

выделений. Исходная микроструктура сплава, представленная эвтектикой с размерами игл 5—30 мкм и кристаллами первичного кремния размером 30—60 мкм, достаточно равномерно распределенными в матрице, после динамического нагружения изменяется: уменьшаются иглы эвтектики, увеличивается расстояние между ними, включения первичного кремния уменьшаются за счет дробления до 25—30 мкм. Причиной дробления кристаллов кремния, по всей видимости, является увеличение уровня микронапряжений, вызванное разницей в значениях упругих свойств и коэффициентов термических расширений кремния и алюминиевой матрицы. В кристаллах кремния, в местах локализации напряжений, преимущественно около межфазовых границ зарождаются трещины, которые увеличиваются по мере возрастания энергии взрыва и двигаются через весь кристалл.

Плотность и твердость силуминов для всех режимов импульсной обработки снижаются на 15—20%, причем наиболее значительно при максимальном значении энергетического воздействия. Аналогичным образом изменяется предел прочности, который также уменьшается с ростом величины импульсного нагружения, обнаруживая хорошее соответствие с изменением твердости. Снижение механических характеристик заэвтектического силумина обусловлено в основном разрыхлением структуры вследствие интенсивного трещинообразования и последующего дробления кристаллов первичного кремния.

В работе [4] рассмотрены особенности динамического нагружения импульсной обработки шихты (кокильных отливок) при получении алюминиевых литейных сплавов. Показано, что такая взрывная обработка (давление до 20 ГПа, время действия 120—150 мкс), использованная для дробления шихты, после переплава лема позволила зафиксировать устойчивые изменения механических характеристик сплава АК5М2 в сторону увеличения, особенно относительного удлинения от 0,4 до 1,25%. Дополнительные изучения микроструктур\* сплава АК5М2 после комплексной обработки (динамического нагружения, переплава и литья в кокиль) выявили измельчение ее фазовых составляющих (рис. 2), в частности, крупноиглочатая эвтектика ( $\alpha + \text{Si} + \text{FeSiAl}_2$ ) пластинчатого строения, дендриты твердого раствора с отдельными пластинами фазы  $\text{CuAl}_2$  в исходном состоянии (рис. 2, а), и ее более равномерное перераспределение в  $\alpha$ -твердом растворе с одновременным уменьшением в 1,5—2,0 раза размеров и количества после динамического нагружения (рис. 2, б). В результате импульсной обработки с последующим переплавом и литьем в кокиль дендриты алюминиевого твердого раствора уменьшаются в 3—4 раза и увеличивается дисперсность составля-

\* При участии И. Н. Казаневской.

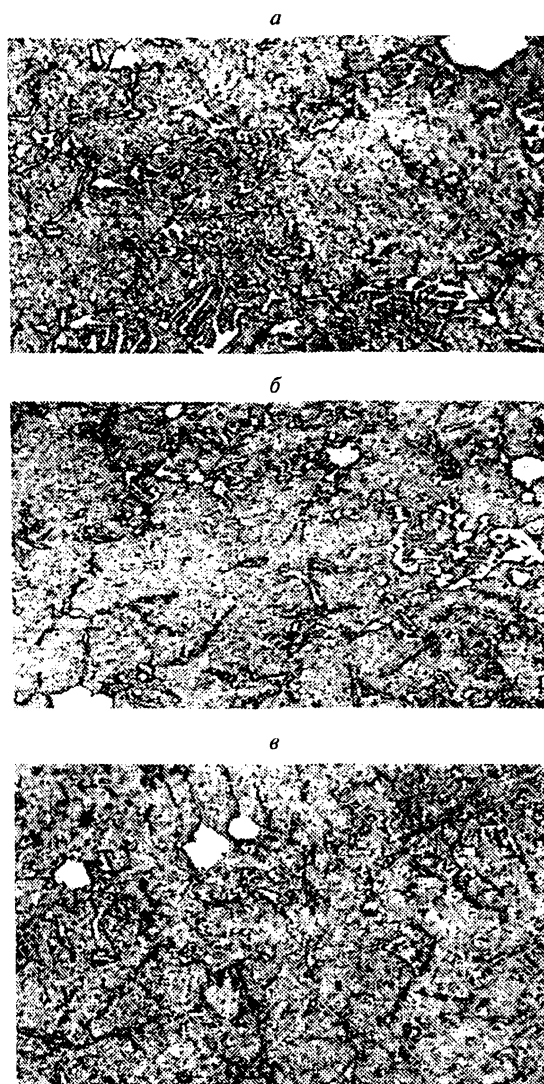


Рис. 2. Микроструктуры сплава АК5М2: а — в исходном состоянии; б — после взрывного нагружения; в — после комплексной обработки: взрывное нагружение + переплав.  $\times 200$

ющих тройной эвтектики (рис. 2, в). Повышенные значения прочности и пластичности после динамической обработки и литейного передела можно объяснить сохранением накопленной структурной наследственности на субмикро- и микроуровнях в локальных объемах сплава за счет изменения раз-

меров и перераспределения в  $\alpha$ -твердом растворе структурных составляющих, особенно фазы  $\text{CuAl}_2$ . Оценка использования импульсной обработки на первой стадии (I) литейно-металлургического передела показала целесообразность ее применения с целью перестройки структуры и улучшения механических свойств алюминиевых литейных сплавов, в частности при получении вторичных сплавов и лигатур.

Анализ управления литой структурой при импульсной обработке на примере алюминиевых сплавов показывает широкие возможности изменения структуры и механических свойств в результате динамического нагружения и сохранения структурной наследственности на различных стадиях литейного производства. В дальнейшем необходима оптимизация температурно-силовых параметров динамического взрывного погружения литых металлов и сплавов для создания более неравновесных структур и условий осуществления фазовых превращений, обеспечивающих существенное повышение их эксплуатационных характеристик.

### Литература

1. Никитин В. И. Основные закономерности структурной наследственности в системе «шихта—расплав—отливка» // Литейное производство. 1991. № 4. С. 4—5.
2. Лекаx С. Н. Ресурсосберегающие технологии получения машиностроительных отливоx из высококачественных чугунов. Мн.: Наука и техника, 1991.
3. Эпштейн Г. Н. Строение металлов, деформированных взрывом. М.: Металлургия, 1988.
4. Андрушевич А. А., Ушеренко С. М. Особенности импульсного нагружения алюминиевых литейных сплавов // Литейное производство. 1999. № 3. С. 24—25.
5. Мурр Л. Е. Микроструктура и механические свойства металлов и сплавов после нагружения ударными волнами // Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. М. А. Мейерса, Л. Е. Мурра: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1984. С. 202—241.
6. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварка взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
7. Ушеренко С. М. Сверхглубокое проникание частиц в преграды и создание композиционных материалов. Мн.: НИИИП с ОП, 1998.
8. Никитин В. И. Наследственность в литых сплавах. Самара: СамГТУ, 1995.