



There are offered and examined the two new methods of casting in solid-liquid state—reocasting- and thixocompacting- useful for casting with the fixed fusion point. There are determined the conditions of these methods realization and experimentally analyzed on the model substances the processes and structure peculiarities of the produced casts.

Н. К. ТОЛОЧКО, Ю. А. ШИЕНОК, А. З. МЯЛЬДУН, С. Е. МОЗЖАРОВ, ИТА НАН Беларуси

УДК 620.22

РЕО- И ТИКСОКОМПАКТИРОВАНИЕ – НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ЛИТЬЮ МАТЕРИАЛОВ В ТВЕРДОЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

Технологии литья материалов в твердожидком (ТЖ) (полутвердом – semi-solid) состоянии, получившие широкое распространение в последние годы, играют важную роль в производстве металлических изделий в различных отраслях промышленности. Толчком к развитию этих технологий послужили результаты исследований тиксотропных свойств материалов в ТЖ состоянии, выполненных в начале 70-х годов [1]. В настоящее время совершенствованию этих технологий уделяется большое внимание в ведущих научных центрах и промышленных фирмах Западной Европы, США, Японии и других стран. Свидетельством тому являются всевозрастающее число публикаций (наиболее крупные обзоры представлены в [2–4]) и проводимые каждые два года, начиная с 1990 г., международные конференции (International Conference on Semi-Solid Process of Alloys and Composites: Sophia-Antipolis, France, 1990; Cambridge, USA, 1992; Tokyo, Japan, 1994; Sheffield, England, 1996; Golden, USA, 1998; Turin, Italy, 2000; Tsukuba, Japan, 2002).

На сегодняшний день наибольшее развитие получили два технических подхода к литью материалов в ТЖ состоянии: реолитье (rheocasting) и тиксолитье (thixocasting) [5, 6].

В реолитье исходным материалом служит расплав, который подвергается частичной кристаллизации в условиях интенсивного перемешивания, обычно осуществляемого с помощью электромагнитных полей или механических мешалок. При этом за счет сдвиговых сил происходит измельчение дендритов. В результате материал переводится в ТЖ состояние, в котором он представляет собой суспензию, состоящую из расплава и равномерно распределенных в его объеме мелких глобулярных кристаллических частиц. Затем полученная таким образом ТЖ смесь инжектируется под давлением в литейную форму, где происходит ее полная кристаллизация до формирования отливки с однородной глобулярной мелкозернистой структурой.

В тиксолитье исходным материалом являются специально приготовленные твердые заготовки

(брикеты), изначально обладающие однородной глобулярной мелкозернистой структурой (один из способов их получения – реолитье). Заготовка сначала частично расплавляется (обычно с использованием индукционного нагрева), переходя в ТЖ состояние. Затем она подается в литейную форму, где в ходе деформирования и последующей кристаллизации формируется отливка, также обладающая однородной глобулярной мелкозернистой структурой. Находясь в ТЖ состоянии, близком к сверхпластичному, когда мелкие глобулярные зерна легко перемещаются в окружающем их расплаве, заготовка способна довольно легко деформироваться и заполнять литейную форму при сравнительно малом давлении.

Главное достоинство рео- и тиксолитья – возможность получать слитки с улучшенной структурой и, как следствие, с повышенными физико-механическими свойствами. Кроме того, литье материала в ТЖ состоянии характеризуется сравнительно малой усадкой, поскольку обработке подвергается частично закристаллизованный расплав. Недостатком этих методов является довольно сложный технологический процесс, включающий в себя две отдельные стадии – перевод материала в ТЖ состояние и литье, для реализации каждой из которых требуются отдельные установки.

В последние годы разработаны модифицированные методы рео- и тиксолитья – соответственно реопресс-литье (rheomoulding) [7] и тиксопресс-литье (thixomoulding) [8]. Эти методы характеризуются более простым, одностадийным технологическим процессом, осуществляемым в единой установке, поскольку здесь перевод материала в ТЖ состояние производится непосредственно в ходе его подачи в литейную форму.

В реопресс-литье, как и в реолитье, исходным материалом служит расплав, который подается в литейную форму с помощью шнекового экструдера. Проходя через экструдер, расплав частично кристаллизуется. В тиксопресс-литье исходным материалом являются специально приготовленные твердые частицы небольших размеров (гранулы

или куски измельченной заготовки), которые подаются в литейную форму также с помощью шнекового экструдера. Проходя через экструдер, частицы частично расплавляются. В обоих методах материал, находясь в экструдере, подвергается перемешиванию за счет вращения винта шнека.

Следует отметить, что эти методы в своих существующих вариантах предназначены в первую очередь для литья сплавов, характеризующихся наличием довольно широкого интервала температур ликвидус – солидус [9]. Благодаря этому становится технически возможным (путем создания соответствующих температурных условий) обеспечивать контролируемый перевод таких материалов в ТЖ состояние и их стабильное пребывание в этом состоянии в течение достаточно длительного промежутка времени. Так, в реолитье или реопресс-литье ТЖ состояние достигается в результате образования в объеме расплава кристаллических частиц тугоплавкого компонента (имеет место так называемая фракционная кристаллизация [10]). В свою очередь в тиксолитье или тиксопресс-литье ТЖ состояние достигается в результате образования в объеме твердого тела включений легкоплавкого компонента (имеет место так называемое фракционное плавление

[10]). В случае же использования материалов с фиксированной точкой фазового перехода кристаллизация–плавление $T_k = T_n$ (чистых металлов или эвтектических сплавов) процессы кристаллизации и плавления становятся трудно контролируемыми. Возникает опасность лавинообразного развития кристаллизации (в реолитье или реопресс-литье) или плавления (в тиксолитье или тиксопресс-литье). Поэтому эти методы до сих пор не получили распространения применительно к материалам указанного типа [9].

В настоящей статье рассмотрены принципиальные возможности литья в ТЖ состоянии материалов с фиксированной точкой фазового перехода кристаллизация–плавление. В частности, предложены два новых метода – рео- и тиксокомпактирование, которые базируются на методах рео- и тиксолитья (рео- и тиксопресс-литья). Основное их отличие обусловлено особенностями осуществляемых в них процессов перевода материала в ТЖ состояние и его последующей обработки.

Общая характеристика методов рео- и тиксокомпактирования

Схемы реализации процессов рео- и тиксокомпактирования показаны на рис.1 и 2.

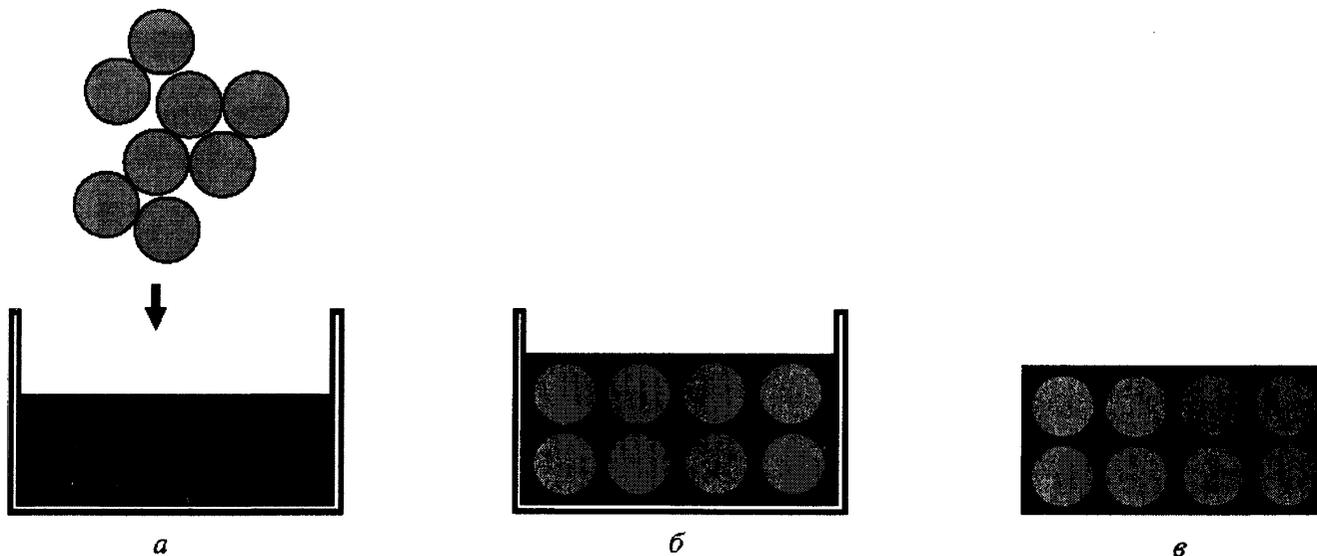


Рис. 1. Схема процесса реокомпактирования: а – исходные твердые частицы на стадии введения в расплав, находящийся в литейной форме; б – твердые частицы, скомпактированные в расплаве, в – слиток, сформированный из твердых частиц и закристаллизованного расплава

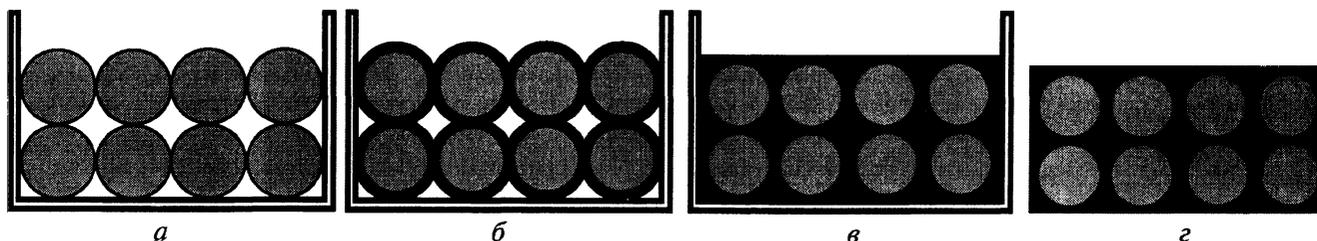


Рис. 2. Схема процесса тиксокомпактирования: а – исходные твердые частицы, введенные в литейную форму; б – частично оплавленные твердые частицы; в – нерасплавившиеся ядра твердых частиц, скомпактированные в расплаве; г – слиток, сформированный из нерасплавившихся ядер твердых частиц и закристаллизованного расплава

При реокомпактировании в литейную форму сначала вводят расплав, а затем твердые частицы того же состава, что и расплав, которые подвергаются компактированию. При этом частицы, находясь в расплаве, приобретают повышенную подвижность и распределяются по всему объему литейной формы, образуя плотную укладку. В свою очередь расплав заполняет пространство между частицами. Возможные излишки расплава выдавливаются за пределы литейной формы. В ходе последующей кристаллизации расплава частицы связываются между собой, образуя слиток.

При тиксокомпактировании в литейную форму загружаются твердые частицы, которые подвергаются частичному плавлению и компактированию. Далее происходят процессы, аналогичные тем, которые имеют место при реокомпактировании, в результате чего также образуется слиток.

Таким образом, рео- и тиксокомпактирование по аналогии с реопресс-литьем и тиксопресс-литьем соответственно характеризуются одностадийным технологическим процессом, осуществляемым в единой установке. В реокомпактировании, так же как и в реопресс-литье, ТЖ состояние материала достигается в результате образования в исходном расплаве твердых частиц. Однако если в реопресс-литье частицы формируются в ходе кристаллизации расплава, то в реокомпактировании частицы вводятся в расплав извне. В свою очередь в тиксокомпактировании, так же как и в тиксопресс-литье, ТЖ состояние материала достигается в результате частичного плавления исходных твердых частиц.

Рассмотрим некоторые закономерности процессов рео- и тиксокомпактирования по сравнению с процессами реолитья/реопресс-литья и тиксолитья/тиксопресс-литья соответственно.

Важной характеристикой всех методов обработки материалов в ТЖ состоянии являются объемные доли твердой и жидкой фаз γ_s и γ_L соответственно, которые достигаются на стадии перевода материала в это состояние. С одной стороны, для обеспечения быстрого затвердения материала одновременно по всему объему в ходе литья желательнее, чтобы материал, находящийся в ТЖ состоянии в литейной форме, имел по возможности наибольшее значение γ_s . С другой стороны, с увеличением γ_s повышается вязкость материала, в результате чего затрудняется подача материала в литейную форму.

Кроме того, в случае реолитья/реопресс-литья, а также тиксопресс-литья по мере затвердения расплава (опять-таки за счет увеличения вязкости) становится все более затруднительным его перемешивание [11]. В общем случае вязкость суспензии увеличивается с γ_s по экспоненциальному закону [12]. Вязкость перемешиваемого расплава во время его затвердения стремительно возрастает при превышении значения $\gamma_s \approx 0,4$ [5,

13]. Таким образом, при $\gamma_s > 0,4$ перемешивание кристаллизующегося расплава становится малоэффективным, особенно в случае реолитья, когда перемешивание осуществляется с помощью электромагнитных полей или механических мешалок. Несколько лучшие условия перемешивания (относительно высокая сдвиговая скорость и интенсивная турбулентность) обеспечиваются в реопресс-литье, а также тиксопресс-литье, в частности, при использовании двухвинтовых шнеков [14]. Как следствие, в силу указанных причин в этих методах γ_s обычно находится в пределах 0,25–0,5 либо не намного превышает 0,5 [13, 15, 16]. Это означает, что структура формируемого слитка определяется в значительной мере структурой кристаллизующего расплава, т. е. условиями кристаллизации.

Иная ситуация имеет место в случае тиксолитья, когда материал переводится в ТЖ состояние в результате частичного плавления массивной заготовки в отсутствие какого бы то ни было специального перемешивания. Здесь значения γ_s могут лежать в более широких пределах — от 0,4 до 0,7 [17–19]. Это означает, что структура формируемого слитка определяется в значительной мере структурой исходного материала заготовки и в гораздо меньшей мере зависит от структуры кристаллизующего расплава, т. е. от условий кристаллизации. Это позволяет, подбирая определенный исходный материал, формировать заданную структуру слитка.

Именно такой подход к формированию структуры слитка лежит в основе методов рео- и тиксокомпактирования. При литье важно получить слиток с беспористой структурой. Такая структура может быть получена при условии $V_0 = V_L$, где V_0 — объем межчастичного пространства к концу процесса компактирования и V_L — объем жидкой фазы, заполняющей межчастичное пространство к концу процесса компактирования. При $V_0 > V_L$ количество жидкой фазы недостаточно, чтобы заполнить это пространство полностью. В результате сформированная структура слитка характеризуется наличием пор. Условие $V_0 = V_L$ является наиболее предпочтительным, так как обеспечивается формирование беспористой структуры при минимальном количестве расплава. Однако на практике довольно трудно определить точное значение V_0 и, как следствие, соответствующее значение V_L . Дело в том, что V_0 зависит не только от степени компактирования частиц, но и от размера и формы частиц. Поэтому даже при достаточно большом давлении компактирования плотность упаковки частиц может быть сравнительно невелика из-за наличия дефектов упаковки, обусловленных сложностью формы частиц или их неодинаковыми размерами. Как известно, V_0 может принимать наименьшее из возможных значений только в идеальном случае, соответ-

ствующем плотнейшей упаковке сферических частиц с одинаковыми размерами. В этом случае коэффициент упаковки $K \approx 0,74$.

В реокомпактировании выполнение условия $V_0 = V_L$ достигается путем уплотнения частиц, введенных в расплав, исходный объем которого V_{L0} заведомо больше V_0 (в случае, когда исходные частицы, будучи введенными в расплав, не подвергаются частичному плавлению). При этом, как отмечалось выше, лишний объем расплава $\Delta V = V_{L0} - V_0$ выдавливается за пределы литейной формы.

В тиксокомпактировании количество жидкой фазы определяется степенью плавления частиц. В этом случае $V_0 = V_{0c}$, где V_{0c} — объем пространства между твердыми нерасплавившимися ядрами частиц к концу процесса компактирования. Соответственно объем образовавшегося расплава $V_1 = V_s - V_c$, где V_s — объем твердых частиц исходного материала и V_c — объем нерасплавившихся ядер частиц. Таким образом, выполнение условия $V_0 = V_L$ достигается путем уплотнения частиц, подвергнутых частичному плавлению, в результате которого объем образовавшегося расплава V_{L0} заведомо больше V_0 . При этом, как и в случае реокомпактирования, лишний объем расплава $\Delta V = V_{L0} - V_0 = V_s - V_c - V_{0c}$ выдавливается за пределы литейной формы.

Характер уплотнения частиц зависит не только от давления компактирования, но и от подвижности частиц. Частицы становятся более подвижными с увеличением количества жидкой фазы, играющей роль смазки. Поскольку в период компактирования частицы находятся в постоянном контакте с жидкой фазой, то будет более корректно говорить не о подвижности частиц, а о подвижности твердожидкой смеси (суспензии), определяемой ее вязкостью μ . В свою очередь μ зависит от вязкости жидкой фазы μ_0 (в случае, когда жидкая фаза не содержит твердых частиц), а также объемной доли жидкой фазы γ_L :

$$\mu = \mu_0 [1 - (1 - \gamma_L) / (1 - \gamma_{Lc})]^{-2},$$

где γ_{Lc} — критическая объемная доля жидкой фазы, ниже которой смесь имеет чрезмерно высокую вязкость [20, 21]. Условие $\gamma_L \approx \gamma_{Lc}$ может иметь место к концу процесса компактирования, когда частицы приобретают наиболее плотную упаковку. В этом случае V_0 (V_{0c}) может принимать минимально возможные значения.

Как отмечалось выше, структура слитка, формируемого при рео- и тиксокомпактировании, в значительной степени определяется структурой исходного материала (частиц), а не структурой закристаллизованного расплава. Поэтому для придания слитку определенной структуры можно использовать специально приготовленные исходные материалы, обладающие соответствующей структурой. В качестве исходного материала желательно применять компоненты с изометри-

ческой (округлой) формой (гранулы). При этом эффект уплотнения может быть наилучшим. Следует заметить, что округления формы частиц можно добиться в ходе их частичного плавления.

Рассмотрим дополнительно некоторые закономерности компактирования, связанные с температурными режимами процесса. Здесь в общем случае могут иметь место различные сценарии развития компактирования, в частности:

в случае реокомпактирования:

- уплотнение частиц завершается до начала кристаллизации расплава;
- уплотнение частиц сопровождается кристаллизацией расплава;

в случае тиксокомпактирования:

- уплотнение частиц сопровождается их частичным плавлением и завершается до начала кристаллизации расплава;
- уплотнение частиц начинается после того, как закончится их частичное плавление, и завершается до начала кристаллизации расплава;
- уплотнение частиц начинается после того, как закончится их частичное плавление, и сопровождается кристаллизацией расплава;
- уплотнение частиц сопровождается их частичным плавлением, а также последующей кристаллизацией расплава.

В связи с этим представляет интерес рассмотреть более детально особенности процессов кристаллизации в случае реокомпактирования и процессов плавления и кристаллизации в случае тиксокомпактирования.

В реокомпактировании кристаллизация расплава начинается на поверхности частиц после их введения в расплав. Характер кристаллизации существенно зависит от исходных температур частиц и расплава [10].

Если частицы с начальной температурой $T_{ч0} < T_k$ контактируют с неперегретым расплавом, имеющим начальную температуру $T_{p0} = T_k$, то за счет теплоты фазового перехода, выделяющейся при образовании кристаллической фазы на поверхности частиц, их начальная температура $T_{ч0}$ постепенно повышается. При $T_{ч} = T_k$ дальнейшая кристаллизация прекращается. Предельная толщина образовавшегося кристаллического слоя определяется температурой $T_{ч0}$, теплофизическими свойствами частиц и расплава и соотношением их масс.

При контакте охлажденных частиц с перегретым расплавом ($T_{p0} > T_k$) на их поверхности также сначала образуется кристаллический слой. Однако далее, если масса расплава достаточно велика по сравнению с массой частиц, то температура последних $T_{ч}$ становится выше T_k . В результате образовавшийся ранее кристаллический слой оплавляется. Более того, возможно даже частичное плавление исходных частиц, если $T_{ч0}$ не намного ниже T_k .

Поскольку кристаллизация расплава осуществляется при фиксированной температуре T_k , то

особенно важно обеспечить строго контролируемые условия ее протекания в случае, когда она происходит параллельно с компактированием частиц. Здесь необходимо подобрать такие режимы этих двух процессов, при которых плотная укладка частиц завершается до формирования кристаллических мостиков между ними, препятствующих их взаимному перемещению. Но даже если такие мостики и возникают, то их можно разрушать (так же как и образующиеся ветви дендритов) за счет повышения давления компактирования.

В тиксокомпактировании, как и в тиксопресс-литье, на всем протяжении процессов частичного плавления частиц и последующей кристаллизации расплава твердая и жидкая фазы в каждый момент времени находятся практически при одной и той же температуре. Поэтому характер этих процессов определяется общими условиями теплообмена в системе твердые частицы – расплав.

Поскольку плавление частиц осуществляется при фиксированной температуре T_n , то важно обеспечить контролируемые условия его протекания, при которых степень плавления частиц является по возможности минимальной. В техническом отношении более просто проводить компактирование частиц (их нерасплавившихся ядер) в ходе их частичного плавления и завершать оба процесса одновременно. В данном случае кристаллизация расплава начинается после окончания компактирования. Технически относительно сложно обеспечить температурные режимы, при которых уплотнение частиц начинается после того, как закончится их частичное плавление, и завершается до начала кристаллизации расплава. Это связано с тем, что компактирование необходимо осуществлять в строго равновесных температурных условиях. Если же компактирование сопровождается кристаллизацией расплава, то, как и в рассмотренном выше случае, следует подобрать такие режимы этих двух процессов, при которых плотная укладка частиц завершается до их сращения в прочный скелет.

Таким образом, основные достоинства методов рео- и тиксокомпактирования сводятся к следующему. Во-первых, возникает возможность достигать больших значений γ_s в материале, находящемся в ТЖ состоянии (до начала кристаллизации расплава). В этом отношении рео- и тиксокомпактирование подобны тиксолитью. В них максимально возможные значения γ_s определяются степенью компактирования частиц и в случае их достаточно плотной упаковки могут достигать в принципе до 0,7 и выше. Как следствие, ввиду большой доли твердой фазы, образованной исходными частицами, структура формируемого слитка определяется в основном структурой этих частиц, которую, в свою очередь, можно задавать заранее. Кроме того, как и в тиксолитье, отпадает необходимость в принудительном пере-

мешивании материала на стадии перевода его в ТЖ состояние. С другой стороны, по сравнению с тиксолитьем упрощается процедура приготовления исходного материала. В этом отношении рео- и тиксокомпактирование подобны тиксопресс-литью. Наконец, как уже упоминалось выше, рео- и тиксокомпактирование характеризуются относительной простотой технологического процесса и оборудования. Здесь перевод материала в ТЖ состояние и его литье осуществляются практически одновременно в одной и той же установке. В этом отношении эти методы подобны рео- и тиксопресс-литью.

Но, пожалуй, главным достоинством этих методов является возможность осуществлять литье в ТЖ состоянии материалов с фиксированной точкой фазового перехода кристаллизация-плавление, что подтверждается представленными ниже результатами предварительных экспериментов, выполненных с некоторыми модельными системами.

Экспериментальное исследование процессов рео- и тиксокомпактирования

Схемы экспериментальных устройств показаны на рис. 3.

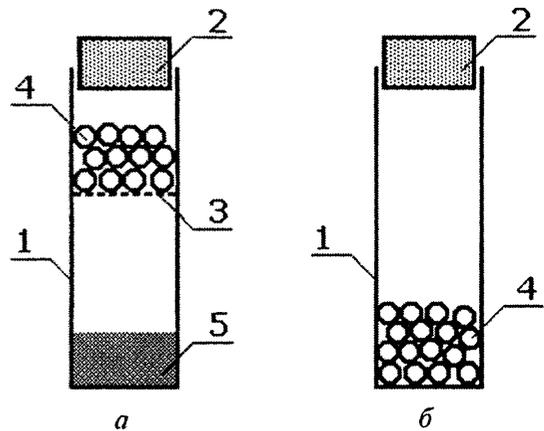


Рис. 3. Схемы экспериментальных устройств для реализации процессов реокомпактирования (а) и тиксокомпактирования (б): 1 — литейная форма; 2 — поршень; 3 — диафрагма; 4 — твердые частицы; 5 — расплав

В случае реокомпактирования устройство представляло собой модель литейной формы в виде стеклянного цилиндра. На дне цилиндра размещали порцию материала, необходимую для образования исходного расплава. Верхняя часть полости цилиндра была перекрыта перфорированной бумажной диафрагмой, на которой размещали исходные частицы из того же материала. Над частицами находился цилиндрический поршень, диаметр которого был несколько меньше внутреннего диаметра цилиндра. Нижнюю часть цилиндра нагревали, вызывая полное расплавление материала на дне цилиндра. Затем приводили в движение поршень. При этом частицы, прорывая

мембрану, перемещались в нижнюю часть цилиндра, погружались в расплав и уплотнялись. Одновременно излишки расплава выдавливались через зазор между цилиндром и поршнем. В ходе последующего охлаждения расплав застывал, связывая частицы между собой.

В случае тиксокомпактирования устройство было аналогично рассмотренному выше с тем лишь отличием, что оно не содержит мембрану. На дне цилиндра размещали исходные частицы. Нижнюю часть цилиндра нагревали так, чтобы обеспечить частичное плавление частиц. Под действием поршня твердые нерасплавившиеся ядра частиц уплотнялись, а образовавшийся расплав заполнял пространство между ними. По аналогии с предыдущими экспериментами излишки расплава выдавливались через зазор между цилиндром и поршнем, а частицы (их нерасплавившиеся ядра) связывались между собой в ходе последующей кристаллизации расплава.

В экспериментах использовали легкоплавкий эвтектический сплав (сплав Розе, 50%Bi25%Sn25%Pb,

$T_k = T_n = 96 \text{ }^\circ\text{C}$) [22]. Исходные частицы имели преимущественно сферическую форму с диаметром около 1,5 мм в случае реокомпактирования и около 2,5 мм в случае тиксокомпактирования. Частицы получали путем диспергирования расплава потоками кипящей воды на множество капель и последующим застыванием этих капель по мере охлаждения воды.

Кроме того, в экспериментах использовали дигидрофосфат аммония ADP ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $T_k = T_n = 190 \text{ }^\circ\text{C}$). Исходные частицы представляли собой монокристаллы с характерной ограненной формой и размерами около 0,7мм, полученные путем массовой кристаллизации раствора.

Чтобы получить расплав в случае реокомпактирования или вызвать частичное (поверхностное) плавление частиц в случае тиксокомпактирования, нижнюю часть цилиндра нагревали до $98 \text{ }^\circ\text{C}$ для сплава Розе и до $193 \text{ }^\circ\text{C}$ для ADP.

Структуры слитков из сплава Розе показаны на рис. 4, 5.

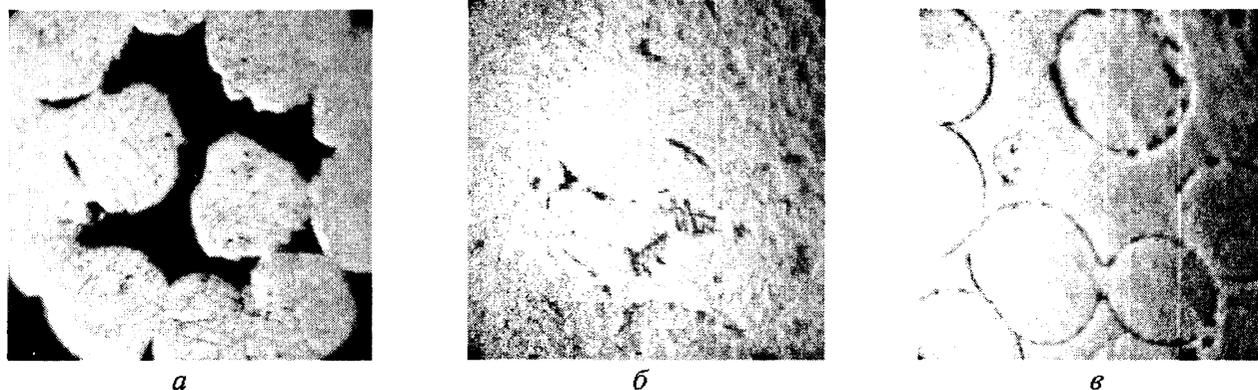


Рис. 4. Структура слитков из сплава Розе, сформированных в результате реокомпактирования при свободной (а) и плотной (б) упаковке частиц и в результате тиксокомпактирования (в) (шлифы). Средний диаметр частиц: 1,5 мм (а, б) и 2,5 мм (в)

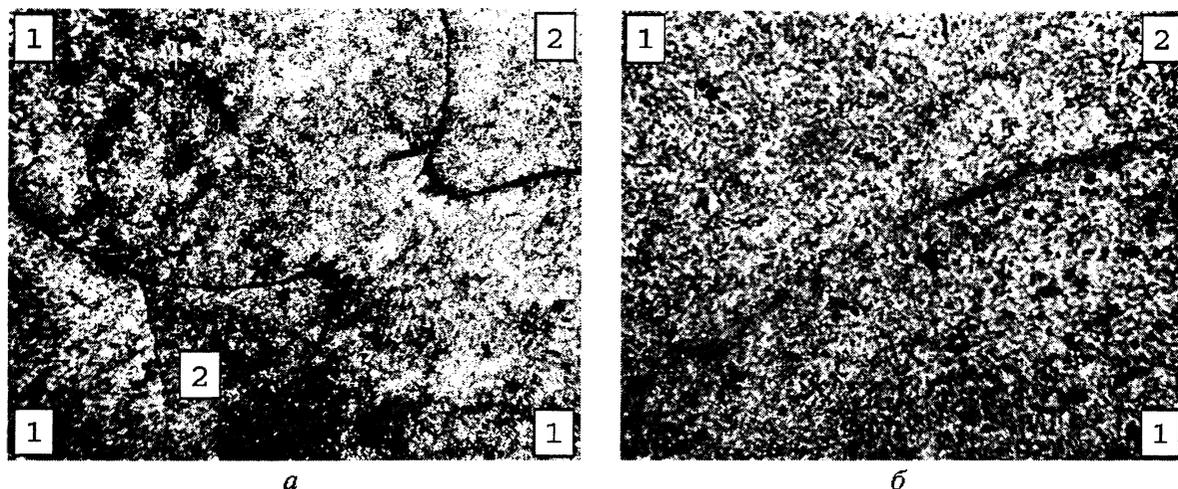


Рис. 5. Структура слитков из сплава Розе, сформированных в результате реокомпактирования (а) и тиксокомпактирования (б) (шлифы). Средний размер частиц: 1,5 мм (а) и 2,5 мм (б): 1 – исходные частицы (а) или нерасплавившиеся ядра частиц (б); 2 – закристаллизованный расплав

При формировании слитков как рео-, так и тиксокомпактированием частицы могут иметь различную плотность упаковки в зависимости от степени компактирования, как это видно из рис. 4, а и б (на примере реокомпактирования).

В общем случае условия формирования структуры исходных частиц и структуры затвердевающего расплава в принципе могут существенно различаться между собой. Как следствие, могут иметь место существенные различия и в получен-

ных при этом структурах. В частности, из рис. 5, а видно, что в слитке, полученном в результате реокомпактирования, частицы характеризуются дендритной структурой, в то время как структура закристаллизованного расплава образована мелкими равноосными зернами. Это может быть объяснено тем, что кристаллизация частиц (в период их формирования) протекала более медленно, чем кристаллизация расплава (в период формирования слитка). В противоположность этому, как видно из рис. 5, б, в слитке, полученном в результате тиксокомпактирования, и частицы (нерасплавившиеся ядра частиц), и закристаллизованный расплав имеют практически одинаковую структуру, образованную мелкими равноосными зернами. Это может быть объяснено следующими обстоятельствами. Расплав, образующийся в результате поверхностного плавления частиц, находится в состоянии, близком к равновесному, и, как следствие, содержит значительное число кластеров (т.е. сохраняет квазикристаллическую структуру, подобную структуре частиц). Поэтому в ходе последующей кристаллизации расплава, наступающей сразу же после его образования, формируется структура, практически повторяющая по своему строению структуру частиц.

Структура слитка из ADP показана на рис. 6 (она является типичной как для рео-, так и тиксокомпактирования). Здесь, так же как и в рассмотренном выше случае, имеют место различия в кристаллическом строении частиц, причем эти различия являются особенно ярко выраженными: частицы обладают монокристаллической структурой, в то время как закристаллизованный расплав — поликристаллической.

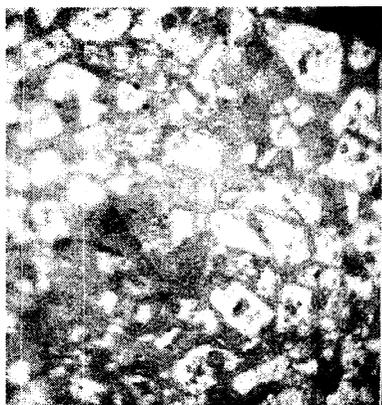


Рис. 6. Типичная структура слитка из ADP, сформированная в результате рео- или тиксокомпактирования (шлиф). Средний диаметр частиц — 0,5 мм

Таким образом, используя методы рео- и тиксокомпактирования, можно в довольно широких пределах управлять структурой формируемого слитка, в том числе получать как однородную, так и гетерогенную структуру. В последнем случае можно говорить о создании разнообразных структур однокомпонентных композитов, структурные элементы которых (матрица и включения) имеют

один и тот же химический состав, но различное кристаллическое строение и, как следствие, различные свойства.

Заключение

Предложенные методы рео- и тиксокомпактирования представляют собой дальнейшее развитие существующих методов литья материалов в ТЖ состоянии. Очевидно, что они по сравнению с существующими методами обладают не только достоинствами, но и недостатками. В частности, при реализации рео- и тиксокомпактирования необходимо особенно строго контролировать температурные и временные параметры процессов. Предложенные методы позволяют существенно расширить спектр используемых материалов, в частности, получать слитки из чистых веществ, а также эвтектических сплавов. Важной их особенностью является также возможность формировать заданную структуру слитков путем применения исходных материалов в виде частиц с соответствующей структурой.

Литература

1. Spenser D.B., Mehrabian R., Flemings M.C. Rheological behavior of Sn-15 Pct Pb in the crystallization range // Metallurgical Trans. 1972. Vol. 3. P. 1925–1932.
2. Flemings M.C. Behaviour of metal alloys in the semisolid state // Metall. Trans. B. 1991. Vol. 22. P. 269–293.
3. Young K.P. Semi-solid metal forming alloys and composites // Proc. Symposium on Nature and Properties of Semi-Solid Materials, J.A.Sekhar and J.A.Dantzing (eds.). TMS, Warrendale, PA. 1992. P. 245–266.
4. Kirkwood D.H. Semisolid metal processing // Int. Mat. Rev. 1994. Vol. 39. P. 173–189.
5. Физическое материаловедение. В 3-х т. / Под ред. Р.У. Кана, П. Хаазена Т. 2. Фазовые превращения в металлах и сплавах и сплавы с особыми свойствами. М.: Металлургия, 1987.
6. Flemings M.C. SSM: some thoughts on past milestones and on the path ahead // Proc. 6-th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Turin, Italy, Sept. 27–29, 2000. P. 11–13.
7. Fan Z., Ji S., Bevis M.J. Twin-screw rheomoulding — a new semi-solid processing technology // Proc. 6-th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Turin, Italy, Sept. 27–29, 2000. P. 61–66.
8. Walukas D., LeBeau S., Prewitt N., Decker R. Thixomoulding — technology opportunities and practical uses // Proc. 6-th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Turin, Italy, Sept. 27–29, 2000. P. 109–114.
9. Atkinson H.V., Karpanos P., Kirkwood D.H. Alloy development for thixofforming // Proc. 6-th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Turin, Italy, Sept. 27–29, 2000. P. 443–450.
10. Гельперин Н.И., Носов Г.А. Основы техники кристаллизации расплавов. М.: Химия. 1975.
11. Kirkwood D.H., Sellars C.M., Eliasboyed L.G. Thixotropic materials. US Patent 5037489, 1991.
12. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии (Поверхностные явления и дисперсные системы). М.: Химия. 1982.
13. Modigell M., Koke J. Time-dependent rheological properties of semi-solid metal alloys // Mechanics of Time-Dependent Materials. 1999. Vol. 3. P. 15–30 (Kluwer Acad. Publishers, Netherlands).
14. Fan Z., Ji S., Bevis M.J. Twin-screw rheomoulding — a new semi-solid processing technology. Proc. 6-th Int. Conf. "Semi-

solid processing of alloys and composites". Turin, Italy, Sept. 27–29, 2000. P. 61–66.

15. Peng H., Hsu W.-M. Development on rheomolding of magnesium parts. 6-th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Turin, Italy, Sept. 27–29, 2000. P. 313–317.

16. Xie S., Ding Z., Guo J., Huang S., Yang X. Deformation behavior of Al-6.6%Si alloy in the semi-solid state. 6th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Turin, Italy, Sept. 27–29, 2000. P. 765–770.

17. Nohn B., Morjan U., Hartmann D. Thixoforming of steel. 6-th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Turin, Italy, Sept. 27–29, 2000. P. 265–272.

18. Chayong S., Karpanos P., Atkinson H.V. Semi-solid processing of aluminum 7075. 6-th Int. Conf. "Semi-solid

processing of alloys and composites". Turin, Italy, Sept. 27–29, 2000. P. 649–654.

19. Nui X.P., Hu B.H., Pinwill I. Semi-solid processing on a near-liquidus cast Al-5%Ni base alloy for anodizing applications 6-th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Turin, Italy, Sept. 27–29, 2000. P. 759–764.

20. Bourell D.L., Marcus H.L., Barlow J.-W., Beaman J. Selective laser sintering of metal and ceramics // Int. J. Powder Met. 1992. Vol. 28, N.4. P.369–381.

21. Agarwala M., Bourell D., Beaman J., Marcus H., Barlow J. Direct selective laser sintering of metals // Rapid Prototyping J. 1995. Vol.1, N1. P.26–36.

22. Yoon S.W., Lee H.M. A thermodynamic study of phase equilibria in the Sn-Bi-Pb solder system // Calphad. 1998. Vol. 22, N.2. P.167–178.



ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ В черной металлургии РФ

Выплавка стали в России в 2002 г. увеличилась по сравнению с 2001 г. на 1,9% – до 58,6 млн. т. Производство проката в 2002 г. оценивается в 48 млн. т (на 2% больше, чем в 2001 г.) и поставки на внутренний рынок – 22,5 млн. т (в 2001 г. – 20,7 млн.).

В I квартале 2002 г. российские производители стальной продукции при поставках за рубеж столкнулись с усилением протекционистских мер. В отрасли обострились такие проблемы, как быстрый рост издержек производства вследствие повышения тарифов на электроэнергию и перевозки железнодорожным транспортом по территории России. Во II полугодии 2002 г. в условиях повышения мировых цен на стальную продукцию три крупнейших в РФ МК – Магнитогорский (ММК), Новолипецкий (НЛМК) и Череповецкий увеличили объемы производства.

Каждый из трех крупнейших МК специализируется на выпуске нескольких видов стальной продукции, используя различную стратегию маркетинга. Так, Череповецкий МК ("Северсталь") идет по пути вертикальной интеграции, Магнитогорский МК предпочитает выпускать широкую гамму продукции, а НЛМК – листовой прокат.

Магнитогорский МК (ММК) в 2002 г. столкнулся с большими трудностями вследствие введения во многих странах ограничений на поставки российской стальной продукции. В 2003 г. руководство ММК намерено сосредоточить усилия главным образом на увеличении в общем объеме производства доли стальной продукции с более высокой добавленной стоимостью. "Северсталь" и НЛМК стремятся наращивать выпуск высококачественной стальной продукции, что особенно важно для получения выгодных экспортных заказов. По данным торговых фирм, существует большая разница в ценах, по которым реализуют холоднокатанную рулонную сталь ММК, "Северсталь", НЛМК по сравнению с другими ее производителями в СНГ. Производство стальной продукции на НЛМК в 2002 г. возросло по сравнению с 2001 г. на 10%. В 2002 г. НЛМК осуществлял программу технического перевооружения предприятия (капиталовложения составили 161 млн. долл.). Программа инвестиций "Северсталь" в 2002 г. оценивалась в 125 млн. долл. На Челябинском МК ("Мечел") выплавка стали в 2002 г. увеличилась на 2%. На этом МК в 2003 г. намечено осуществить программу модернизации (инвестиции составят 62 млн. долл.), что позволит расширить выплавку стали почти на 10% – до 4,25 млн. т. В частности, к концу 2003 г. намечено ввести в эксплуатацию МНЛЗ и модернизировать аглофабрику.

"Евразхолдинг" становится ведущим игроком на российском рынке и контролирует деятельность Западносибирского МК (МК "Запсиб") в г. Новокузнецк и Нижнетагильского МК (НТМК) в г. Нижний Тагил. В 2002 г. выпуск стальной продукции на МК "Запсиб" увеличился по сравнению с 2001 г. на 2,3% – до 5 млн. т. Ее экспорт составил 2,7 млн. т. На МК "Запсиб" в прошлом году в кислородно-конвертерном цехе была введена в действие МНЛЗ мощностью 1,3 млн. т в год.

"Евразхолдинг" планирует инвестировать до 2008 г. в развитие Нижнетагильского МК 480 млн. долл.

С целью укрепления своей сырьевой базы группа заинтересована также в приобретении акций железорудных предприятий – Соколовско-Сарбайского в Казахстане и Михайловского ГОКа в РФ.

На Кузнецком МК (КМК) выплавка стали в 2002 г. вследствие финансовых трудностей резко сократилась на 31,9% – до 2,4 млн. т. Пять лет назад из-за нестабильности финансового положения данное предприятие было объявлено банкротом. В 2002 г. КМК понес убытки в размере 64,8 млн. руб. и в 2001 г. – 761 млн. руб. Администрация по банкротству с 1998 г. не смогла изменить на КМК ситуацию к лучшему. В октябре 2002 г. "Евразхолдинг" приобрел у Кузнецкого МК (КМК) отделение по выпуску рельсов и железнодорожных материалов и к концу 2003 г. намерен приобрести активы сталеплавильного отделения КМК, а также цех по обработке железной руды и электростанцию, принадлежащие КМК. Все активы КМК по условиям процесса о банкротстве необходимо продать до конца текущего года. С 2002 г. на КМК осуществляется программа реконструкции, предусматривающая сокращение производства нерентабельных видов продукции и снижение доли мартеновской стали в общей ее выплавке. Полагают, что это позволит стабилизировать производство и облегчит выход на мировой рынок. В 2003 г. на КМК будут продолжены работы по модернизации электросталеплавильного цеха и выплавка электростали будет увеличена до 1,2 млн. т в год.

Деятельность российского трубного сектора зависит от правительственных проектов строительства нефте- и газопроводов. "Объединенная металлургическая компания" ("ОМК") недавно заключила три контракта на изготовление стальных труб для магистральных трубопроводов на о. Сахалин. Инвестиции "ОМК" в 2003 г. оцениваются в 50 млн. долл. Высокие цены на нефть побуждают вкладывать средства в строительство трубопроводов. Производство труб "Трубной металлургической компанией" ("ТМК") в 2002 г. составило 2,1 млн. т, "ОМК" – 0,7, Чусовским заводом – 0,4 и ЧТПЗ – 0,6 млн. т.

Российские производители поставляют трубы "Газпрому", в частности Челябинский трубопрокатный завод (ЧТПЗ) и Волжский трубный завод. Недавно ЕБРР предоставил ЧТПЗ кредит в размере 50 млн. долл. на финансирование программы модернизации производства. Волжский трубный завод в 2002 г. вложил 30 млн. долл. в развитие мощностей по выпуску спиральношовных труб диаметром 1420 мм.

В перспективе ожидается усиление процесса консолидации национальной металлургической отрасли. Российские производители стремятся выступать на внешних рынках в качестве равноправных торговых партнеров с зарубежными компаниями.