



There is experimentally investigated the evolution of the structure at casting of materials in hard-liquid state by method of thixocompacting by the example of fusible systems. There are determined the temporary dependencies of the particles diameters, distances between their centers and porosity under different conditions of the process (sizes and space distribution of the particles of basic material, temperature regimes, the compacting pressure).

Н. К. ТОЛОЧКО, Ю. А. ШИЕНОК, ИТА НАН Беларуси

УДК 620.22

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛИТЬЯ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТИКСОКОМПАКТИРОВАНИЯ

В последние годы в машиностроительной индустрии находят широкое распространение методы производства металлических изделий путем литья материалов в твердо-жидком состоянии (semisolid casting) [1]. Эти методы эффективно применяются прежде всего для литья изделий из сплавов, характеризующихся наличием широкого интервала температур ликвидус – солидус. Среди них значительное развитие получили методы, основанные на использовании в качестве исходного материала специально приготовленных объемных слитков – тиксолитье (thixocasting) [2, 3] или сравнительно мелких частиц (гранул, кусков, полученных в результате нарезки или дробления, и т. п.) – тиксопресс-литье (thixomoulding) [4]. В обоих случаях исходный материал, находящийся в твердом состоянии, сначала переводится в твердо-жидкое состояние, после чего инжектируется в литейную форму, где затвердевает, образуя слиток.

Дальнейшим развитием указанных методов является тиксокомпактирование (thixocompacting) [5]. Особенность этого метода состоит в том, что он позволяет получать изделия из материалов с фиксированной точкой фазового перехода кристаллизация–плавление (в том числе, из чистых металлов). В этом методе частицы, играющие роль исходного материала (как и в случае тиксопресс-литья), сначала загружаются в литейную форму, где затем подвергаются частичному поверхностному плавлению и компактированию. При этом частицы, окруженные расплавом, приобретают повышенную подвижность и распределяются по всему объему литейной формы, образуя плотную укладку. В свою очередь, расплав заполняет пространство между частицами.

Таким образом, отличительной чертой метода тиксокомпактирования являются особые условия перехода материала в твердо-жидкое состояние. Настоящая статья посвящена экспериментальному изучению особенностей этого перехода и их влияния на последующее формирование структуры слитка.

Исследования проводили на примере сплава Вуда (50% Bi, 25% Pb, 12,5% Sn, 12,5% Cd) с

температурой плавления $T_{пл} = 68 \text{ }^\circ\text{C}$ с помощью экспериментальной установки, показанной на рис. 1. Установка состояла из вертикально расположенной прозрачной кюветы с плоскопараллельными стенками, которая размещалась в термостате, представляющем собой прозрачный сосуд, также с плоскопараллельными стенками, заполненный жидкостью (водой), температура которой регулировалась. В кювету, играющую роль литейной формы, загружали частицы исходного материала и подвергали их компактированию с помощью поршня, который входил в кювету сверху и оказывал на частицы давление силой F . Одновременно частицы подвергали нагреву, вызывая их поверхностное оплавление. В результате частицы уменьшались в диаметре D , их нерасплавившиеся ядра перегруппировывались, а образовавшийся расплав заполнял пространство между ними. Излишки расплава выдавливались за пределы пространства, занятого формируемым слитком, через небольшие зазоры между кюветой и поршнем. После завершения процесса плавления–компактирования материал охлаждали, в результате чего расплав кристаллизовался и ядра частиц связывались образующимися кристаллическими прослойками.

В ходе экспериментов посредством цифровой видеокамеры, сопряженной с компьютером, осуществляли видеозапись эволюции структуры исходного материала, включая переход материала в твердо-жидкое состояние (поверхностное плавление).

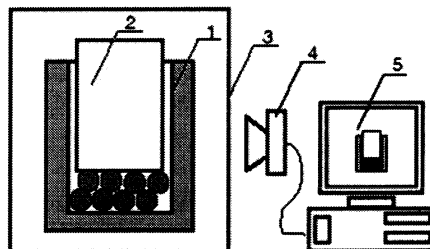


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – кювета; 2 – поршень; 3 – термостат; 4 – видеокамера; 5 – компьютер

ние и перегруппировку частиц) и его дальнейшее затвердевание (кристаллизацию расплава) с последующей обработкой параметров процессов при кадровой развертке видеозаписи. С помощью данной методики определяли временные зависимости изменения диаметра частиц $D(t)$, расстояния между частицами $L(t)$ и пористости трансформируемой структуры P , а также усадку материала γ к концу тиксокомпактирования.

В разных экспериментах применяли частицы одинакового диаметра либо смеси частиц разных диаметров. В первом случае крупные частицы, диаметр которых (1,2 мм) соответствовал толщине кюветы, размещали рядами, расположенными один над другим. При этом частицы имели регулярную упаковку. Во втором случае мелкие частицы располагали между крупными частицами. При этом регулярность упаковки частиц в целом нарушалась. Кроме того, в разных экспериментах изменяли силу давления поршня F и температурные режимы. Общие условия проведения экспериментов приведены в табл. 1, а соответствующие температурные режимы – на рис. 2. Указанные вариации условий экспериментов позволяли выявить особенности тиксокомпактирования в зависимости от основных параметров процесса, таких, как гранулометрический состав и пространственное распределение частиц исходного материала, температурные параметры, определяющие характер оплавления частиц, и степень компактирования, определяющая характер перегруппировки частиц (их нерасплавившихся ядер).

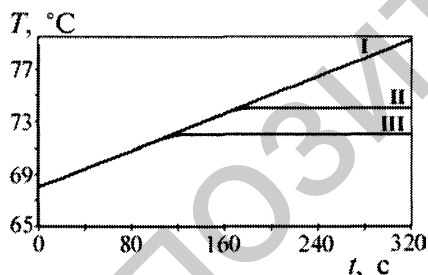


Рис. 2. Температурные режимы тиксокомпактирования

Типичные картины эволюции структуры материала на разных стадиях тиксокомпактирования для различных экспериментов представлены на рис. 3, 4. Частицы по мере оплавления уменьшались в размере и их нерасплавившиеся ядра уплотнялись под действием силы давления поршня. Уплотнение происходило преимущественно в вертикальном направлении без существенного изменения исходного взаимного расположения частиц. Следствием такой перегруппировки частиц (ядер) являлось деформирование окружающего их слоя расплава, особенно отчетливо наблюдаемое в случае крупных частиц: этот слой сплющивался сверху и снизу, вызывая оголение поверхности частиц у верхней и нижней вершины, и, наоборот, расширялся в боковые стороны. Поэтому в экспериментах реально удавалось достаточно строго регистрировать усредненное уменьшение диаметра частиц в вертикальном направлении. Аналогично наблюдалось довольно заметное уменьшение среднего расстояния между центрами частиц в вертикальном и наклонных направлениях, в то время как в горизонтальном направлении это расстояние оставалось также почти неизменным. По мере оплавления и уплотнения частиц поры между ними уменьшались, заполняясь расплавом. Как следствие, пористость структуры в целом становилась все меньше и в конце концов формировался слиток с плотной структурой, практически лишенной пор. В экспериментах регистрация изменения параметров D , L и P осуществлялась для крупных частиц (типичные результаты измерений показаны на рис. 5, 6).

В случае одинаковых по размерам частиц кривые $D(t)$ и $L(t)$ носят практически один и тот же характер: они почти совпадают друг с другом (эксперименты № 1–4). Это свидетельствует о том, что исходное взаимное расположение частиц сохраняется в ходе тиксокомпактирования, что возможно при условии их довольно плотной исходной упаковки. В данных экспериментах упаковка частиц была близка к плотней-

Таблица 1. Условия экспериментов

Номер эксперимента	Характеристика частиц исходного материала	Сила давления поршня, Н	Тип температурного режима
1	Сферические частицы диаметром $D_1 = 1,2$ мм	$F_1 = 1,5$	I
2		$F_2 = 4,5$	I
3		$F_2 = 4,5$	II
4		$F_2 = 4,5$	III
5	Смесь сферических частиц диаметрами $D_1 = 1,2$ мм и $D_2 = 0,37$ мм (общий объем частиц диаметра D_2 : общий объем частиц диаметра $D_1 = 1:7$)	$F_1 = 1,5$	I
6	Смесь сферических частиц диаметром $D_1 = 1,2$ мм и частиц неправильной формы (опилок) со средним размером $D_3 = 0,2$ мм (общий объем частиц диаметра D_3 : общий объем частиц диаметра $D_1 = 1:5$)	$F_1 = 1,5$	I

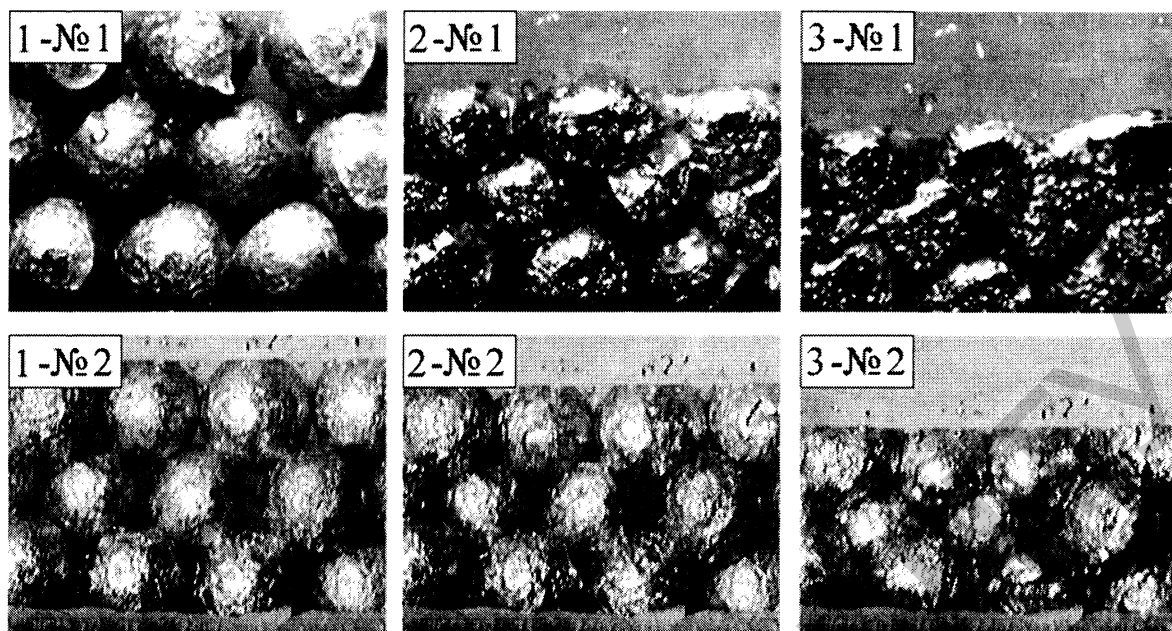


Рис. 3. Картины эволюции структуры материала на разных стадиях тиксокомпактирования (номера экспериментов указаны на фотографиях): $t = 0$ (1), 160 (2) и 320 с (3) (№1); $t = 0$ (1), 80 (2) и 140 с (3) (№2)

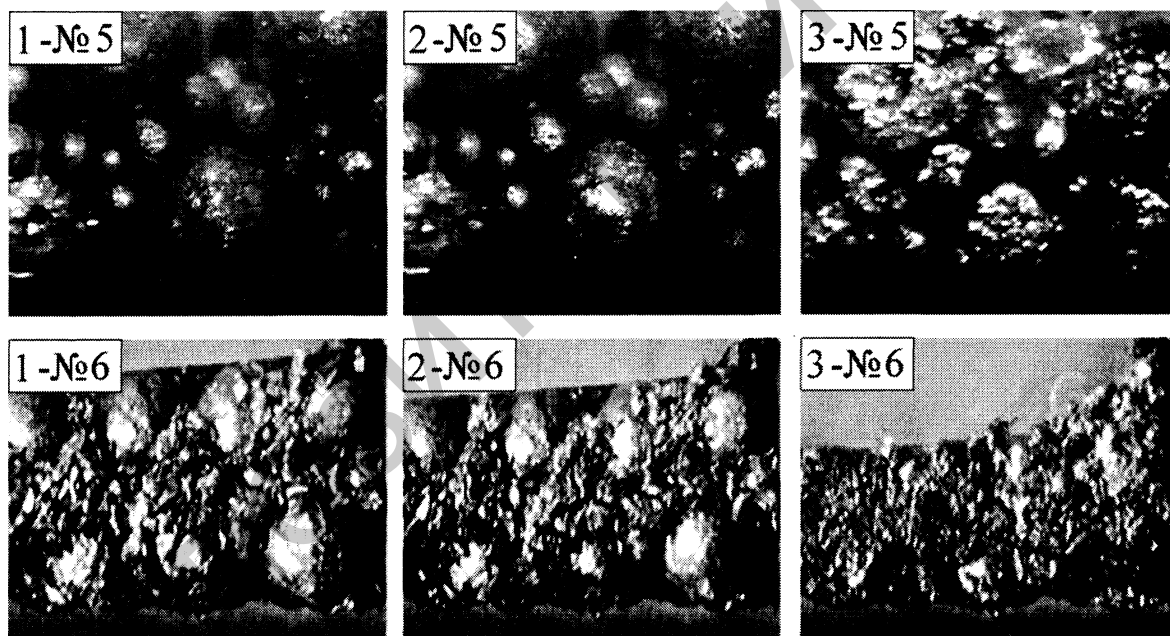


Рис. 4. Картины эволюции структуры материала на разных стадиях тиксокомпактирования (номера экспериментов указаны на фотографиях): $t = 0$ (1), 160 (2) и 320 с (3)

шей. Из сравнения кривых $D(t)$ и $L(t)$ в экспериментах № 1 и 2 видно, что с увеличением давления компактирования эти кривые становятся более крутыми, т. е. формирование плотной структуры слитка завершается за более короткое время. Это объясняется наличием сопротивления течения расплава, которое оказывает ограничивающее влияние на скорость перегруппировки частиц. Степень этого влияния уменьшается с увеличением давления компактирования. Аналогично из сравнения кривых $D(t)$ и $L(t)$ в экспериментах № 2, 3 и 4 видно, что эти кривые становятся

более крутыми с увеличением температуры нагрева, т. е. с увеличением скорости оплавления частиц. Следствием более быстрого развития тиксокомпактирования является более быстрое достижение плотной структуры слитка, как это видно из сравнения кривых $D(t)$ и $L(t)$ с кривыми $P(t)$ в экспериментах № 1–4.

Таким образом, в общем случае скорость сближения частиц может лимитироваться как скоростью их компактирования, так и скоростью их оплавления, в зависимости от того, какая из них меньше. Очевидно, что на практике следует

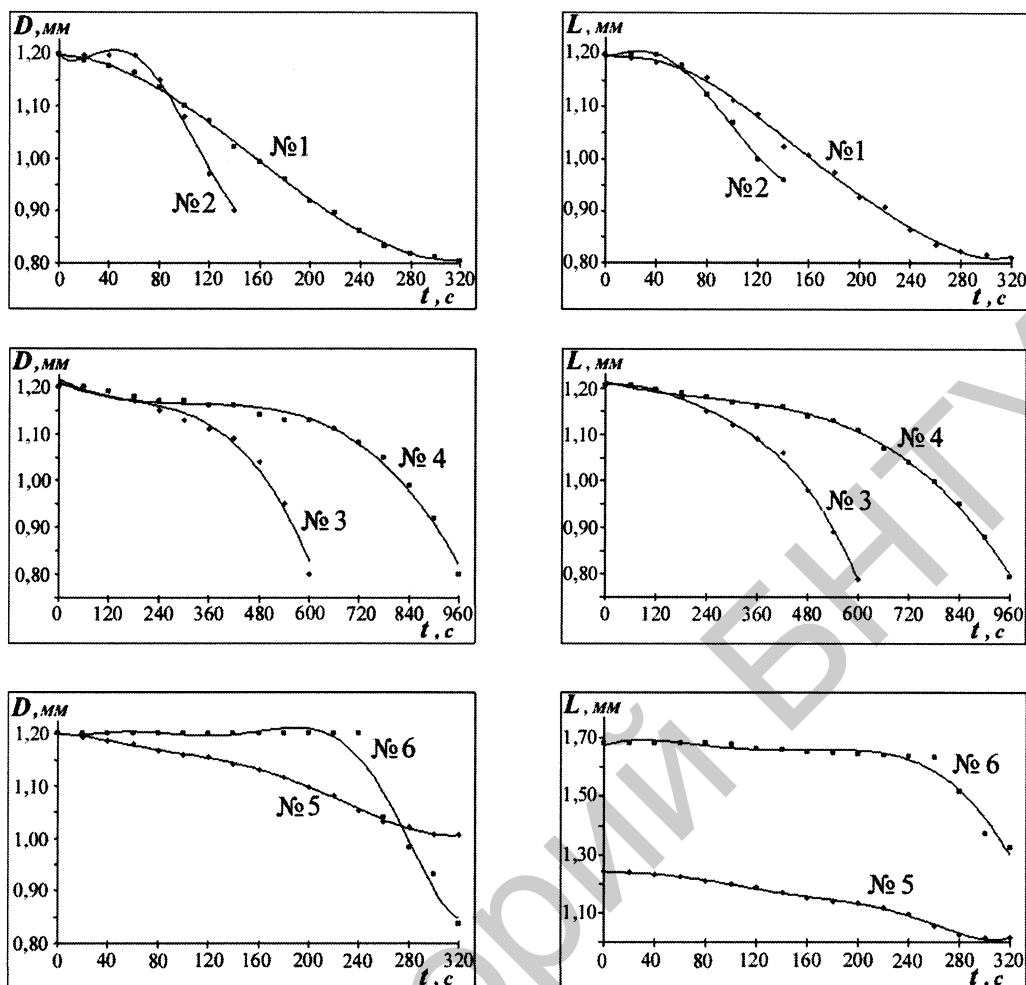


Рис. 5. Изменение диаметра крупных частиц D и расстояния между их центрами L во времени (номера экспериментов указаны на графиках)

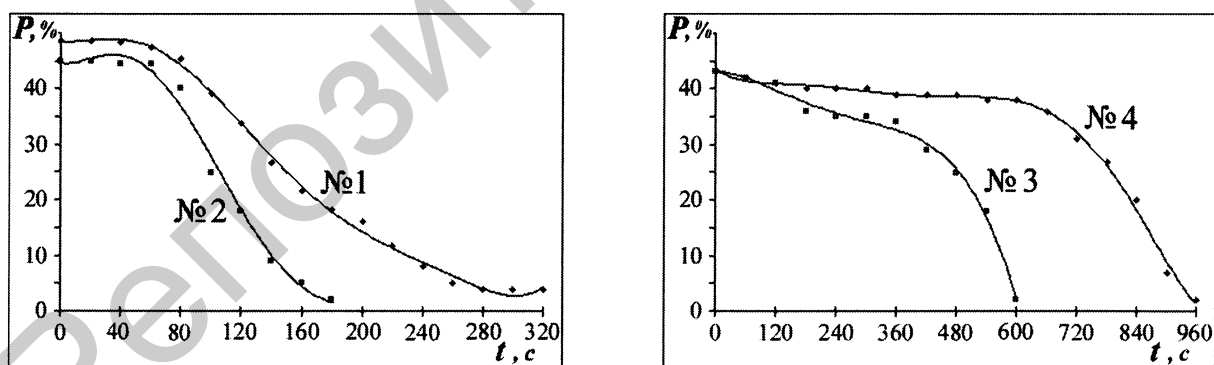


Рис. 6. Изменение пористости P во времени (номера экспериментов указаны на графиках)

стремиться прежде всего к снятию ограничений по скорости сближения частиц, накладываемых процессом компактирования, за счет увеличения силы давления поршня F . Что же касается увеличения скорости оплавления частиц за счет повышения температуры нагрева, то здесь необходимо учитывать то, что чрезмерный нагрев может привести к неконтролируемому развитию процесса плавления. Как следствие, объемная доля расплава может оказаться чрезмерно большой и соответственно размеры частиц (неоплавившихся

ядер) чрезмерно малы. Кроме того, при этом возникает опасность полного расплавления частиц.

В случае смесей частиц различных размеров кривые $D(t)$ и $L(t)$ также носят подобный характер (эксперименты № 5 и 6). Вместе с тем наблюдается уменьшение степени изменения во времени параметров D и L (отношений D_0/D_f и L_0/L_f , где D_0 и L_0 – начальные значения; D_f и L_f – конечные значения) (табл. 2). Соответственно имеет место увеличение значений D_f и L_f .

Таблица 2. Значения отношений D_0/D_f и L_0/L_f при различных условиях экспериментов

Номер эксперимента	1	2	3
D_0/D_f	1,5	1,2	1,4
L_0/L_f	1,45	1,2	1,3

В ходе тиксокомпактирования происходит усадка материала, которая тем больше, чем меньше плотность исходной упаковки частиц и чем больше степень их оплавления. В случае одинаковых по размерам частиц в принципе может быть обеспечена их плотнейшая упаковка с коэффициентом компактности $K \approx 0,74$, если частицы имеют изометрическую форму (сферическую в идеальном случае). Если форма частиц неправильная, то плотность упаковки уменьшается. Компактность укладки частиц увеличивается в случае смесей частиц с существенно различающимися размерами, когда мелкие частицы заполняют пространство между крупными частицами, находящимися, в свою очередь, в состоянии довольно плотной упаковки. Если же разница в размерах частиц в смеси сравнительно невелика, то компактность их укладки, наоборот, понижается.

Итак, как следует из экспериментов, характер формирования структуры слитка при тиксо-

компактировании существенным образом зависит от условий проведения процесса, важнейшими из которых являются гранулометрический состав и пространственное распределение частиц исходного материала, температурные режимы и давление компактирования. Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации параметров процесса тиксокомпактирования.

Литература

1. Flemings M.C. SSM: some thoughts on past milestones and on the path ahead // Proc. 6th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Turin. Italy. Sept. 27–29. 2000. P. 11–13.
2. Kirkwood D.H. Semisolid processing of high melting point alloys // Proc. 4th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Sheffield. England. June 19–21. 1966. P. 320–325.
3. Jurko J.A., Niu X.P., Pinwill I. Thixocasting of near-liquidus cast Al-Mg based alloy // J. Mater. Sci. Letters. 1999. V M, Vol. 18. P. 1869–1870.
4. Walukas D., Le Beau S., Prewitt N., Decker R. Thixomoulding – technology opportunities and practical uses // Proc. 6th Int. Conf. "Semi-solid processing of alloys and composites". Turin. Italy. Sept. 27–29. 2000. P. 109–114.
5. Толочко Н.К., Шиенок Ю.А., Мьяльдун А.Я., Мозжаров С.Е. Рео- и тиксокомпактирование – новые подходы к литью материалов в твердожидком состоянии // Литье и металлургия. 2003. № 2. С. 39–46.