



УДК 669.154

Поступила 01.11.2013

Н. К. ТОЛОЧКО, А. А. АНДРУШЕВИЧ,
УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»

КЛАСТЕРНАЯ СТРУКТУРА РАСПЛАВОВ

Выполнен краткий анализ современных представлений о кластерной структуре расплавов металлов и на основе этих представлений рассмотрены возможные механизмы процессов кристаллизации расплава и плавления слитка.

Brief analysis of contemporary conceptions of metal melt cluster structure is presented and probable mechanisms of melt crystallization and ingot melting processes are considered on the base of these conceptions.

Введение. История развития кластерной теории расплавов насчитывает несколько десятилетий, однако до сих пор основные положения этой теории все еще окончательно не сформулированы [1–3]. На сегодняшний день нет общепринятого понятия кластеров расплава, тем не менее, дискуссии о кластерной структуре расплавов не прекращаются. Это обусловлено тем, что кластерный подход к изучению свойств расплавов позволяет объяснить ряд особенностей в характере поведения расплавов, не поддающихся объяснению с точки зрения классической теории расплавов, согласно которой единственно возможными структурными элементами расплавов являются атомы. Интерес к исследованиям в области кластерной структуры расплавов существенно повысился за последние 10–15 лет. Об этом свидетельствует резко возросший поток публикаций по данной тематике.

Кластерные модели расплавов. Известны различные модели кластерной структуры расплавов. В настоящее время наиболее широкое распространение получила квазиполикристаллическая модель расплавов [4–7]. В рамках этой модели предполагается, что расплав металла по своей структуре во многом близок поликристаллическому металлическому слитку, а именно расплав состоит из кластеров – микроскопических скоплений упорядоченно расположенных атомов и межкластерной разупорядоченной зоны, образованной хаотически расположенными атомами, подобно тому, как слиток состоит из кристаллических зерен и межзеренных границ.

Кластеры и разупорядоченная зона непрерывно обмениваются между собой атомами [7]. При постоянной температуре такой обмен носит равновесный характер и не приводит к изменению соот-

ношения объемов, занимаемых кластерами и разупорядоченной зоной. Однако с изменением температуры это соотношение также изменяется: с повышением температуры доля кластеров уменьшается, а доля разупорядоченной зоны соответственно увеличивается [5–9]. При достижении некоторой предельной температуры наступает полное разупорядочение расплава, при этом кластеры исчезают, а разупорядоченная зона занимает весь объем расплава, в результате чего расплав приобретает газоподобную структуру [7] (в работе [10] разупорядоченная зона расплава называется «квазигазом»). Объемную долю кластеров в расплаве иначе называют коэффициентом кластеризации, величину которого определяют произведением числа кластеров на число атомов в кластере, отнесенным к общему числу атомов в расплаве [9].

Кластеры характеризуются размерами, которые меньше размеров критических кристаллических зародышей, способных давать начало росту кристаллов [6, 11]. Они обладают малым временем жизни, которое составляет 10^{-7} – 10^{-8} с, так что после своего образования они практически сразу же распадаются. Однако время жизни кластеров гораздо больше периода тепловых колебаний, наблюдаемых в расплавах металлов (10^{-14} – 10^{-13} с) [6, 8, 12]. Таким образом, кластеры представляют собой, хотя и короткоживущие, но все же достаточно устойчивые группировки атомов [8].

Как отмечалось выше, кластеры и разупорядоченная зона непрерывно обмениваются между собой атомами. Иначе можно сказать, что разупорядоченная зона играет роль промежуточной среды, посредством которой атомы от одних кластеров переходят к другим [6, 7]. Таким образом, в расплаве непрерывно происходят процессы перерож-

дения кластеров, в результате чего в одних микро-объемах расплава кластеры уменьшаются в размерах и в конце концов распадаются, в то время как в других их размеры, наоборот, увеличиваются [8].

Число атомов, входящих в состав кластеров расплавов металлов, в разных работах различное: от нескольких сотен до нескольких сотен тысяч; соответственно размеры кластеров могут составлять от одного нанометра до нескольких десятков нанометров [6, 7, 13].

Тот факт, что кластеры по своим размерам меньше критических кристаллических зародышей, означает, они по определению не имеют четко выраженных поверхностных границ [8, 12]. Таким образом, что в расплавах не существует межфазных поверхностей раздела между кластерами и разупорядоченной зоной, т. е. расплавы, структурными составляющими которых являются кластеры и разупорядоченная зона, представляют собой гомогенные однофазные системы.

В [12, 16] в рамках квазиполикристаллической модели расплавов дается определение кластеров, основанное на фононной теории, а именно: под кластерами понимаются области расплава, в пределах которых тепловые колебания атомов согласованы. Соответственно под разупорядоченной зоной понимается область расплава, в пределах которой тепловые колебания атомов не согласованы, т. е. каждый атом колеблется независимо от колебаний окружающих атомов. Определенные таким образом кластеры могут включать десятки и сотни атомов, согласованность теплового движения атомов в которых уменьшается по мере повышения температуры. Аналогичный подход к рассмотрению кластерной структуры расплавов, основанный на использовании фононной теории, используется в работе [4].

В [16] с учетом положений фононной теории рассматривается один из возможных механизмов перехода кластеров в разупорядоченную зону расплава. Этот переход может произойти в том случае, когда приходят в соприкосновение два кластера, атомы которых совершают тепловые колебания в противофазе. При этом становятся возможными столкновения атомов этих кластеров при максимальных встречных скоростях движения в ходе тепловых колебаний. При таком взаимодействии кластеров часть атомов, прилегающих к поверхностям кластера, может приобрести высокую кинетическую энергию, достаточную для их перехода в разупорядоченную зону.

Согласно квазиполикристаллической модели расплава, кластеры распределяются по всему объему расплава. Однако есть и иной взгляд на процес-

сы кластеризации в расплавах, в соответствии с которым кластеры сосредоточиваются только лишь в пограничном переходном слое расплава, формирующемся перед фронтом кристаллизации [14].

Существуют различные объяснения возможных причин образования кластеров в расплаве. В частности, предполагается, что кластеры могут формироваться в результате тепловых флуктуаций, имеющих место в расплаве [6, 13]. Вместе с тем, в работе [1] делается заключение о том, что кластеры не следует отождествлять с тепловыми флуктуациями, поскольку время жизни кластеров на несколько порядков больше времени существования тепловых флуктуаций. Кроме того, предполагается, что кластеры могут возникать в результате плавления кристаллических тел [2]. В рамках упомянутого выше рассмотрения квазиполикристаллической модели расплава с позиций фононной теории считается, что кластеры образуются в результате согласования теплового движения атомов расплава, чему способствует его высокая плотность, при которой независимые колебания атомов затруднены [14].

В [17] выдвигается предположение о том, что образование кластеров происходит на основе «димеров», которые возникают в ходе первоначального объединения свободных атомов и играют роль ядер кластеров. Затем вокруг этих ядер выстраивается система последовательных атомных оболочек. В результате создается «оболочечная структура» кластеров. Подобный механизм образования кластеров предлагается в [18], где обсуждается модель «двухбарьерной нуклеации». В рамках этой модели сначала формируется кристаллическое ядро кластера в виде элементарной ячейки Бравэ, вокруг которого располагается упорядоченная жидкокристаллическая оболочка. При этом появление кристаллического ядра означает преодоление первого энергетического барьера зарождения кристаллов. Далее происходит последовательное ячеечное разрастание ядра, в ходе которого преодолевается второй энергетический барьер зарождения кристаллов, после чего наступает необратимый процесс роста кристалла.

Кластерные механизмы кристаллизации. Согласно классической теории кристаллизации, образование кристаллических зародышей, т. е. устойчивых упорядоченных атомных группировок с размерами, равными или превышающими размеры критических кристаллических зародышей, осуществляется путем объединения отдельных атомов в результате флуктуационных процессов, происходящих в расплаве, а рост кристаллов – путем присоединения к ним отдельных атомов. Однако

в рамках такой теории не удастся объяснить наблюдаемые в экспериментах высокие скорости кристаллизации расплавов, которые на несколько порядков больше скорости кристаллизации, рассчитанной в соответствии с этой теорией [14]. Причины столь быстрого образования кристаллической фазы объясняются особой ролью кластеров в процессе кристаллизации, в частности, их объединением (срастанием) с образованием кластерных агрегатов [2, 14].

В связи с этим особого внимания заслуживает кластерно-коагуляционная модель кристаллизации расплавов [19–21], согласно которой в кристаллизующемся расплаве постоянно протекают процессы коагуляции кластеров, приводящие к образованию кристаллических зародышей, и также процессы коагуляции зародышей, приводящие к образованию кристаллических зерен.

В [22] предполагается, что образование кристаллических зародышей путем взаимодействия двух кластеров становится возможным при условии, когда атомы взаимодействующих кластеров колеблются с небольшой разностью фаз. Лимитирующим звеном кристаллизации являются встречи таких кластеров, вероятность которых может быть увеличена созданием в расплаве гидродинамических возмущений, в частности, вибрацией расплава.

В [19, 20] для описания кинетики коагуляции зародышей формально используется теория коагуляции М. Смолуховского. Наиболее вероятные срастания, обеспечивающие прочные контакты, имеют место при сближении зародышей одинаковыми кристаллографическими плоскостями. Такая подстройка зародышей друг другу происходит в результате их поступательных, колебательных или вращательных движений (считается [10], что из всех возможных видов движений кластеров наиболее интенсивным является их вращение). Коагуляция зародышей может происходить в условиях их броуновского движения, а также в условиях перемешивания расплава [23]. При этом считается, что срастание зерен происходит наиболее интенсивно после того как они в процессе роста достигнут определенной величины.

В [2] указывается, что вероятность срастания зерен в значительной мере зависит от фактора времени, т. е. от продолжительности процесса кристаллизации. Время нужно для подстройки друг к другу соседних зерен в ходе их перемещения в кристаллизующемся расплаве (в разупорядоченной зоне расплава). Чем больше время перемещения, тем более крупными получаются окончательные зерна-сростки, формирующие слиток, тем меньше их количество в слитке. Наоборот, если

кристаллизующийся расплав охлаждается быстро, то время на подгонку соседних зерен уменьшается, они не успевают срастись и образуют в структуре слитка самостоятельные зерна с собственной границей раздела. Слиток в этом случае имеет мелкозернистую структуру.

Как отмечалось выше, существует особый взгляд на кластерный механизм роста кристаллов, согласно которому кластеры первоначально формируются в пограничном переходном слое расплава, т. е. непосредственно у растущей поверхности, после чего они высаживаются на эту поверхность [14].

Возможность роста кристаллов за счет присоединения к ним кластеров не исключает возможность их роста за счет присоединения к ним атомов из разупорядоченной зоны расплава. Именно такие представления о росте кристаллических зерен получили развитие в [2, 24, 25]. При этом в [24, 25] рассматривается особый механизм роста зерен, называемый механизмом кластерной адсорбции, в соответствии с которым и кластеры, и атомы, участвующие в процессе роста зерен, концентрируются в приповерхностном слое расплава.

В [24] с учетом механизма кластерной адсорбции дается объяснение причинам более высокой вязкости расплавов металлов с неметаллическими включениями по сравнению с чистыми расплавами, не содержащими таких включений. Указанный эффект повышения вязкости обусловлен тем, что неметаллические включения оказываются окруженными значительными по толщине слоями из адсорбированных на них кластеров.

Факт срастания кластеров означает, что, во-первых, количество возникающих центров кристаллизации многократно больше количества получаемых в слитке кристаллов, и, во-вторых, в ходе кристаллизации размеры кристаллов увеличиваются, а их количество уменьшается [2].

С позиций кластерной теории кристаллизации расплавов даются объяснения причин дефектов, которые характерны для реальной структуры слитка. Так, зерна слитка формируются в процессе роста кристаллических зародышей, которые, в свою очередь, образуются в результате слияния кластеров, содержащихся в расплаве. Если при этом кластеры в зависимости от их концентрации, взаимной ориентации и подвижности успевают сориентироваться «благоприятными» плоскостями, то образуются монокристалльные зародыши, в противном случае возникают зародыши с искаженной структурой [19]. Таким образом, несовершенства структуры зерен начинают проявляться уже на стадии образования кристаллических зародышей. Аналогично на стадии роста кристаллов к ним

присоединяются кластеры, которые могут иметь неточную ориентировку по отношению к кристаллической решетке растущего кристалла, что приводит к возникновению дислокаций и развитию блочной (мозаичной) структуры зерен [14, 16, 22, 26].

Кластерные механизмы плавления. При плавлении слитка кристаллическая фаза полностью не разрушается, а частично сохраняется в образовавшемся расплаве в виде кластеров [10]. Формирование кластерной структуры расплава при плавлении слитка связывается с его исходной зеренной и субзеренной структурой [27–29]. Активное плавление слитка начинается в областях с сильно развитой дефектной структурой, а именно на границах зерен и субзерен. В результате плавления эти границы превращаются в межкластерные прослойки разупорядоченной зоны расплава. В свою очередь, зерна и субзерна в результате плавления превращаются в кластеры. Фактически образующиеся таким образом кластеры представляют собой нерасплавившиеся ядра зерен и субзерен. При этом расплавившаяся часть зерен и субзерен переходит в разупорядоченную зону.

В [1] указывается, что плавление можно рассматривать как процесс дробления макроскопического твердого тела на отдельные кластеры с увеличением расстояния между ними до того предела, при котором происходит разрыв межатомных связей, соединяющих поверхность двух соседних кластеров.

Учет кластерного механизма плавления слитка имеет практическое значение при модифицировании расплава, которое проводится с целью получения мелкозернистой структуры слитка в процессе кристаллизации. Так, для более эффективного измельчения зерна слитка предлагается использовать модифицирующие прутки с ярко выраженным субзеренным строением, благодаря чему подвергаемый кристаллизации расплав обогащается кластерами – будущими источниками кристаллических зародышей [27].

Некоторые особенности в характере формирования кластерной структуры расплава имеют место в случае плавления нанокристаллического слитка. Такой слиток состоит из нанозерен, не имеющих субзеренного строения. Как следствие, межкластерные прослойки разупорядоченной зоны расплава образуются в результате полного плавления границ нанозерен, а кластеры – в результате частичного плавления нанозерен [30].

В связи с обсуждением возможных причин образования кристаллических зародышей в расплаве, включая их образование в результате плавления

слитка, возникает вопрос о размере критических кристаллических зародышей, или, другими словами, о минимально возможном размере атомных группировок, обладающих кристаллической структурой. Для оценки этого размера используется понятие координационного числа, т. е. числа ближайших к данному атому соседних атомов, расположенных в кристаллической решетке [31]. Совокупность ближайших соседних атомов образует 1-ю координационную сферу. Аналогично можно говорить о 2, 3, 4-й и т. д. координационных сферах. По мере уменьшения размера субзерна (нанозерна) может сложиться такая ситуация, что элементы симметрии, присущие данному типу кристаллов, будут исчезать, т. е. дальний порядок в расположении атомов будет нарушаться и соответственно количество координационных сфер будет сокращаться. Условно принято считать, что нижний размерный предел кристаллического состояния наступает в том случае, когда размер кристаллов становится соизмеримым с тремя координационными сферами. С дальнейшим уменьшением размеров субзерна (нанозерна) переходят в кластеры, которые теряют симметричные свойства, присущие кристаллической структуре.

В литейной практике с целью получения мелкозернистой структуры слитка расплав, полученный в процессе плавления, перед последующей кристаллизацией подвергают специальной температурно-временной обработке [7, 32–34]. При этом благодаря перегреву расплава (нагреву выше температуры плавления) достигается более высокая степень его переохлаждения. При незначительном перегреве расплава сплава Fe-Si над ликвидусом (1475 °C) кристаллизация начинается при переохлаждении на 10 °C, в то время как при повышении температуры расплава до 1550 °C переохлаждение составляет 65 °C [33]. Зависимость условий перегрева расплава от условий его последующей кристаллизации, находящая свое отражение в явлениях так называемой структурной наследственности, объясняется исходя из представлений о кластерной структуре расплавов [34]. При нагреве расплава размеры содержащихся в нем кластеров уменьшаются и в конце концов кластеры полностью распадаются (закономерности изменения размеров кластеров с изменением температуры рассмотрены в [2]). Если температура нагрева расплава выше температуры распада кластеров, то расплав превращается целиком в разупорядоченную зону, состоящую из атомов, поэтому при его кристаллизации исходная структура металлической шихты не восстанавливается. Если же температура нагрева расплава ниже температуры распада кла-

стеров, то в расплаве еще остаются неразрушенные кластеры, унаследованные от материалов шихты, поэтому при кристаллизации такого расплава на этих кластерах зарождаются кристаллы и формируется наследственная структура исходной шихты.

Выводы

Кластерная теория расплавов, несмотря на долгую историю своего развития, до сих пор далека от своего завершения. На сегодняшний день отсутствуют убедительные экспериментальные доказательства существования кластеров в расплавах, а предлагаемые различными исследователями кластерные модели расплава носят гипотетический характер. Причем в большинстве этих моделей в основном находят в той или иной мере свое отражение основопола-

гающие представления о кластерной структуре расплавов, которые были выдвинуты на рубеже 1920–1930 гг. американским физиком Г. В. Стюартом на основе данных рентгенографического анализа жидкостей [1, 2]. Интерес к кластерной теории расплавов обусловлен тем, что она позволяет дать объяснению целому ряду особенностей в характере поведения расплавов, установить взаимосвязи между структурой расплава и структурой слитка, между процессами кристаллизации и процессами плавления. Следует ожидать, что дальнейшее развитие этой теории позволит найти эффективные пути оптимизации технологических процессов, обеспечивающих получения литых металлов и сплавов с улучшенными структурными и физико-механическими характеристиками.

Литература

1. Ершов Г. С., Черняков В. А. Строение и свойства жидких и твердых металлов. М.: Металлургия, 1978.
2. Гаврилин В. И. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. Владимир: Владим. гос. ун-т., 2000.
3. Жукова Л. А. Строение металлических жидкостей: учеб. пособ. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002.
4. Копцев В. В. Модель предкристаллизационных процессов // Изв. Челябинск. науч. центра. 2001. Вып. 4 (26). С. 30–33.
5. Новохатский И. А., Ярошенко А. В. Определение плотности металлических жидкостей в приповерхностных слоях с учетом явления кластерной адсорбции // Тр. Одес. политех. ун-та. 2002. № 1 (17). С. 1–5.
6. Смирнов А. Н. Крупный слиток / А. Н. Смирнов [и др.]; Донецк. нац. техн. ун-т. Донецк: Вебер (Донецк. отд.), 2009.
7. Скребцов А. М. Изучение структурных перестроек в жидких металлах на модельном расплаве / А. М. Скребцов [и др.] // Вісник Приазов. держ. тех. ун-ту. 2008. Вип. 18. С. 61–65.
8. Ладьянов В. И. Структурные превращения в металлических расплавах и их проявление при затвердевании и кристаллизации быстрозакаленных сплавов: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Челябинск, 2004.
9. Гей С. Л. Особенности процесса кристаллизации металлов / С. Л. Гей [и др.] // Вестн. Грод. гос. ун-та им. Я. Купалы. Сер. 6. Техника. 2012. № 2. С. 36–43.
10. Ильинский А. Г. Особенности атомного строения металлических материалов в жидком и аморфном состояниях / А. Г. Ильинский [и др.] // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології. 2010. Т. 8. № 3. С. 483–502.
11. Поздняков В. А. Физическое материаловедение наноструктурных материалов: учеб. пособ. М.: МГИУ, 2007.
12. Большаков В. И. О кластерной модели строения металлических расплавов / В. И. Большаков [и др.] // Вісник Придніпровськ. держ. акад. буд. та архітект. Дніпропетровськ: ПДАБА, 2008. № 4–5. С. 8–12.
13. Сулицин А. В. К вопросу о механизме модифицирования меди / А. В. Сулицин [и др.] // Уч. зап. Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2010. Т. 1. № 3. С. 73–81.
14. Иванов И. А. Кинетический фазовый переход при кристаллизации металлов из расплава: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2007.
15. Давыдов С. В. Наномодификатор как инструмент генной инженерии структурного состояния расплава чугуна / С. В. Давыдов // Машиностроение. 2008. № 6. С. 6–13.
16. Большаков В. И. О структурной наследственности при плавлении металлов и некоторые кластерные модели жидких металлов / В. И. Большаков, Г. М. Воробьев, Н. А. Ротт // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. Днепропетровск: ПГАСА, 2009. С. 1–5.
17. Мельников Г. А. Структурные свойства конденсированных сред в рамках кластерной модели / Г. А. Мельников [и др.] // Уч. зап.: электрон. науч. журн. Курск. гос. ун-та, 2011. № 4 (20).
18. Цветков Е. Г. Наноразмерные стадии кристаллогенезиса из жидкой фазы / Е. Г. Цветков, Б. И. Кидяров // Зап. Рос. минералог. об-ва, 2007. Ч. 136, спец. вып. С. 66–76.
19. Александров В. Д. Исследование кинетики реального зародышеобразования при кристаллизации переохлажденного расплава из аморфной среды: дис. ... д-ра хим. наук. М., 1992.
20. Александров В. Д. Коагуляция нанозародышей по механизму спекания при взрывной кристаллизации / В. Д. Александров [и др.] // Вісник Донбас. нац. акад. буд. и архітект., 2010. Вып. 1(81). С. 194–200.
21. Александров В. Д. Расчет параметров зародышеобразования при кристаллизации расплавов по кривым охлаждения / В. Д. Александров [и др.] // Физ.-хим. аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / под общ. ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова. Тверь: Твер. гос. ун-т. 2011. Вып. 3. С. 5–12.
22. Большаков В. И. Кластерные модели жидкости и пути повышения качества металлических отливок / В. И. Большаков [и др.] // Теор. и практ. металлургии. 2010. № 5–6. С. 120–123.
23. Осипов А. В. Кинетика массовой кристаллизации расплава на начальной стадии / А. В. Осипов // ФТТ. 1994. Т. 36. № 5. С. 1213–1228.

24. Новохатский И. А. Особенности кластерной адсорбции на неметаллических включениях в жидкой стали / И. А. Новохатский, И. В. Ярошенко // Тр. Одес. политехн. ун-та, 1998. Вып. 1 (5): Машиностроение. Энергетика. Химия и химтехнология. С. 241–244.
25. Ярошенко И. В. Определение удельного электрического сопротивления металлических жидкостей в приповерхностных слоях с учетом кластерной адсорбции / И. В. Ярошенко, И. А. Новохатский // Тр. Одес. политехн. ун-та. 2003. Вып. 1(19).
26. Большаков В. И. Происхождение дислокаций и кластерная модель жидкости / В. И. Большаков [и др.] // Металознавство та термічна обробка металів: Науков. та інформ. журн. ПДАБА, Днепропетровск. 2008. № 3. С. 5–10.
27. Лопатина Е. С. Изучение механизма модифицирования алюминиевых сплавов и закономерностей структурообразования при получении литейных материалов методом высокоскоростной кристаллизации-деформации: дис. канд. техн. наук. Красноярск, 2005.
28. Жилыев П. А. Влияние микроструктуры материала на динамическую пластичность и прочность: молекулярно-динамическое моделирование / П. А. Жилыев [и др.] // Физ.-хим. кинетика в газовой динамике: электрон. журнал. 2010. № 1. С. 104–109.
29. Шадричев Е. В. Материаловедение (технология конструкционных материалов): учеб.-метод. комплекс / Е. В. Шадричев, А. В. Сивенков, Т. П. Горшкова. СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008.
30. Алексеенко В. В. Коллективная мода при плавлении кристалла с гранцентрированной решеткой / В. В. Алексеенко, А. Э. Ржечицкий // ФТТ. 2009. Т. 51. Вып. 8. С. 1596–1598.
31. Наноматериалы и нанотехнологии / В. М. Анищик [и др.]; под ред. В. Е. Борисенко и Н. К. Толочко. Минск: Изд. центр БГУ, 2008.
32. Деев В. Б. Исследование наследственного влияния шихты на свойства силуминов и разработка ресурсосберегающей технологии получения герметичных отливок: дис. ... канд. техн. наук. Новокузнецк, 2001.
33. Ладьянов В. И. Влияние температуры расплава на кристаллизацию и свойства сплава Fe – 10 ат.% Si / В. И. Ладьянов, И. В. Стяжкина, Л. В. Камаева // Перспективные материалы. 2010. С. 251–254.
34. Скребцов А. М. Структурные превращения в алюминиевом сплаве в зависимости от режимов температурно-временной обработки / А. М. Скребцов, Г. А. Иванов, Д. И. Петренко // Тр. Одес. политехн. ун-та. 2005. Вып. 2(24). С. 75–78.

Репозиторий