

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный индустриальный университет»  
Российская академия естественных наук

*90-летию Сибирского государственного  
индустриального университета посвящается*

**ВЕСТНИК  
ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ СЕКЦИИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ  
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**

Отделение металлургии

*Сборник научных трудов*

*Издается с 1994 г. ежегодно*

Выпуск 42

Москва  
Новокузнецк  
2019

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

В 387

**В 387 Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии:** Сборник научных трудов. Вып. 42 / Редкол.: Е.В. Протопопов (главн. ред.), М.В. Темлянцев (зам. главн. ред.), Г.В. Галевский (зам. главн. ред.) [и др.]: Сибирский государственный индустриальный университет. – Новокузнецк, 2019 – 191 с., ил.

Издание сборника статей, подготовленных авторскими коллективами, возглавляемыми действительными членами и членами-корреспондентами РАЕН, других профессиональных академий, профессорами вузов России. Представлены работы по различным направлениям исследований в области металлургии черных и цветных металлов и сплавов, порошковой металлургии и композиционных материалов, физики металлов и металловедения, экономики и управления на предприятиях.

Сборник реферируется в РЖ Металлургия.

Электронная версия сборника представлена на сайте <http://www.sibsiu.ru> в разделе «Научные издания»

Ил. 66, табл. 22, библиогр. назв. 170.

*Редакционная коллегия:* Аренс В.Ж., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН, вице-президент РАЕН, г. Москва; Райков Ю.Н., д.т.н., д.ч. РАЕН, председатель горно-металлургической секции РАЕН, АО «Институт Цветметобработка», г. Москва; Протопопов Е.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (главный редактор), СибГИУ, г. Новокузнецк; Темлянцев М.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Галевский Г.В., д.т.н., проф., д.ч. РАЕН (зам. главного редактора), СибГИУ, г. Новокузнецк; Буторина И.В., д.т.н., проф., СПбГПУ, г. Санкт-Петербург; Волокитин Г.Г., д.т.н., проф., д.ч. МАНЭБ, ТГАСУ, г. Томск; Медведев А.С., д.т.н., проф., д.ч. МАН ВШ, НИТУ «МИСиС», г. Москва; Немчинова Н.В., д.т.н., проф., НИ ИрГТУ, г. Иркутск; Руднева В.В., д.т.н., проф. (отв. секретарь), СибГИУ, г. Новокузнецк; Спирин Н.А., д.т.н., проф., д.ч. АИН, УрФУ, г. Екатеринбург; Черепанов А.Н., д.ф.-м.н., проф., член РНК ТММ, ИТПМ СО РАН, г. Новосибирск; Юрьев А.Б., д.т.н., проф., СибГИУ, г. Новокузнецк.

УДК 669.1(06)+669.2/.8.(06)+621.762(06)+669.017(06)

ББК 34.3я4

## Содержание

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....                                                                                                                                   | 6  |
| МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ.....                                                                                               | 7  |
| <i>А.А. Уманский, Я.В. Денисов</i>                                                                                                                 |    |
| Исследование влияния параметров производства слитков конвертерной стали на качество их внутренней структуры.....                                   | 8  |
| <i>А.А. Уманский, А.В. Головатенко, А.С. Симачев, О.А. Решетнев</i>                                                                                |    |
| Анализ влияния параметров производства электростали на качественные показатели рельсов.....                                                        | 16 |
| <i>А.А. Уманский, А.В. Головатенко, А.С. Симачев</i>                                                                                               |    |
| Исследования состава и распределения неметаллических включений по сечению рельсовых профилей .....                                                 | 22 |
| <i>В.Б. Деев, А.И. Куценко, О.Г. Приходько, Е.С. Прусов, А.А. Соколов</i>                                                                          |    |
| Влияние внешних воздействий на процессы кристаллизации сплавов и затвердевания отливок.....                                                        | 28 |
| <i>А.Г. Никитин, К.С. Медведева, П.Б. Герике</i>                                                                                                   |    |
| Экспериментальное исследование процесса разрушения кусков ферросплава в одновалковой дробилке с упором на валке .....                              | 37 |
| <i>А.Г. Никитин, А.В. Абрамов, В.В. Горяшин</i>                                                                                                    |    |
| Исследования работы щековой дробилки с устройствами выборки зазоров в шарнирах .....                                                               | 40 |
| ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....                                                                                             | 43 |
| <i>Т.И. Алексеева, Г.В. Галевский, В.В. Руднева, С.Г. Галевский</i>                                                                                |    |
| Освоение технологии производства нанокристаллического карбида циркония.....                                                                        | 44 |
| ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ.....                                                                                                              | 49 |
| <i>С.С. Мишуков, В.Б. Деев, Н.А. Белов, А.А. Соколов</i>                                                                                           |    |
| Разработка высокопрочного литейного сплава на основе системы легирования Al-Zn-Mg-Fe-Ni .....                                                      | 50 |
| <i>С.С. Мишуков, В.Б. Деев, С.М. Дубинский, А.А. Соколов</i>                                                                                       |    |
| Исследование литейных свойств, структуры и свойств высокопрочных сплавов системы Al-Zn-Mg-Ni-Fe .....                                              | 54 |
| <i>В.В. Дорошенко, В.Б. Деев, Н.А. Белов</i>                                                                                                       |    |
| Исследование жидкотекучести сплавов на основе алюминиево-кальциевой эвтектики .....                                                                | 63 |
| <i>В.В. Дорошенко, В.Б. Деев, Н.А. Белов</i>                                                                                                       |    |
| Исследование возможности использования шихты с повышенным содержанием железа при получении сплавов на основе алюминиево-кальциевой эвтектики ..... | 66 |

В.Б. Деев<sup>1</sup>, А.И. Куценко<sup>2</sup>, О.Г. Приходько<sup>2</sup>, Е.С. Прусов<sup>3</sup>,  
А.А. Соколев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет  
МИСиС», г. Москва

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный  
университет», г. Новокузнецк, Россия

<sup>3</sup>Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,  
г. Владимир

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВОВ И ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК

В статье рассмотрены общие закономерности формирования структуры отливок и слитков из алюминиевых сплавов, обработанных внешними воздействиями в процессах литья. Показано, что применение физических способов обработки расплавов при плавке и кристаллизации позволяет целенаправленно управлять формированием структуры литых заготовок за счет модифицирующего эффекта.

The paper discusses the general regularities of formation of the structure of castings and ingots of aluminum alloys, processed by external influences in the casting processes. It is shown that the use of physical methods of melts processing during smelting and crystallization allows to purposefully controlling the formation of the structure of cast billets due to the grain refinement effect.

Многочисленные исследования структурных особенностей строения металлов и сплавов в литом состоянии подтверждают, что решающее влияние на свойства отливок оказывают размер и форма кристаллических зерен, их преимущественная ориентировка, сегрегация растворимых и нерастворимых примесей, а также величина и распределение усадочной пористости [1-3]. При этом было выяснено, что степень развития сегрегации в макро- и микрообластях, усадочной пористости и других дефектов строения литых металлов и сплавов в общем случае определяется формой роста кристаллов и структурой фронта кристаллизации на каждом этапе затвердевания отливки [4].

В реальных условиях затвердевания отливок для всех промышленно значимых металлов и сплавов характерна дендритная форма роста кристаллов. В этой связи, степень развития указанных дефектов строения литых металлов и сплавов определяется структурой фронта кристаллизации и, следовательно, теми процессами, которые обуславливают формирование кристаллического строения отливки из данного металла или сплава. Поэтому меха-

нические и эксплуатационные свойства реальных отливок практически полностью определяются их кристаллическим строением. Для отливок и слитков характерным является наличие трех макроструктурных зон: периферийной, мелкозернистой (зоны «замороженных» кристаллов), зоны столбчатых кристаллов и центральной зоны равноосных кристаллов. Наружный слой отливок со случайно ориентированными кристаллами, выросшими на начальной стадии затвердевания в условиях взаимной конкуренции, называют еще быстроохлажденной зоной [5]. Наружный слой становится неотчетливым при увеличении температуры заливаемого металла, поскольку образующиеся при заливке на стенках формы кристаллы оплавляются сильно перегретым жидким металлом.

Столбчатые кристаллы растут под влиянием теплоотвода, направленного к стенке литейной формы. В отливках это вызывает общее ухудшение механических свойств, а также приводит к снижению сопротивляемости металлов и сплавов образованию горячих трещин при литье. В слитках в местах стыка зон столбчатых кристаллов происходит расслоение во времяковки или прокатки. Поэтому в большинстве случаев необходимо избегать образования столбчатой структуры для получения мелкозернистого строения отливок.

Среди разнообразных типов кристаллов в литых металлах механизм образования равноосных кристаллов наиболее сложен для понимания. Известно несколько теорий для объяснения этого явления. Первая теория утверждает, что равноосные кристаллы начинают зарождаться в расплаве перед растущей поверхностью раздела жидкой и твердой фаз. Чтобы объяснить зарождение равноосных кристаллов у фронта растущей столбчатой зоны, необходимо предположить наличие здесь переохлажденной зоны. Вайнгард и Чалмерс [5] объяснили это, используя концепцию конституционального переохлаждения. Они сделали заключение, что центральная жидкая область может быть конституционально переохлаждена вследствие ликвации растворенного вещества у растущей поверхности раздела фаз таким образом, что в переохлажденной области могут зарождаться частицы, вызывающие образование равноосных кристаллов.

Согласно второй теории, центральная равноосная зона формируется с помощью свободных резкоохлажденных кристаллов. Эти кристаллы могут зарождаться в переохлажденной области вблизи стенки формы во время заливки металла. Некоторые из свободных кристаллов «выживают» в условиях перегрева и переносятся в центральную зону отливки, где дорастают до зерен окончательного размера. Эта идея была первоначально предложена Гендерсом в 1926 г. и позднее Чалмерсом [5].

В соответствии с третьей теорией равноосные кристаллы создаются из частично переплавленных дендритов при пульсациях температуры расплава во время роста столбчатой зоны, которые возникают благодаря конвекции расплава у поверхности раздела жидкой и твердой фаз. Особое значение имеет оплавление дендритов растущей твердой оболочки, это явление рассматривается как главный фактор формирования равноосных кристаллов [5].

Согласно четвертой теории, предложенной А. Оно и его сотрудниками [5], кристаллы зарождаются на стенке формы или на охлажденной поверхности расплава и растут с образованием шеек. Затем эти шейкообразные кристаллы отделяются от места зарождения до того, как успеет сформироваться твердая оболочка, окончательно осаждаются и накапливаются с образованием равноосной структурной зоны.

Образование «нижнего конуса» слитка все теории кристаллизации объясняют осаждением кристаллов, растущих свободно в расплаве перед фронтом кристаллизации. Осаждение кристаллов возможно по двум причинам. Первая состоит в том, что кристаллы тяжелее расплава и под действием гравитационных сил могут опускаться вниз. Этой точки зрения придерживаются теории Д.Д. Саратовкина [6], В.И. Добаткина [7], В.О. Гаген-Торна и Н.И. Хворинова [8].

Вторая причина осаждения свободных кристаллов состоит в том, что в расплаве, охлаждающемся в изложнице, развивается естественная конвекция, при которой более холодный расплав вблизи фронта кристаллизации опускается вниз, а более горячий в центре слитка поднимается вверх. Кристаллы, растущие перед фронтом кристаллизации, могут увлекаться опускающимся потоком расплава и перемещаться в нижнюю часть слитка, где они, потеряв скорость, остаются (теория Г.П. Иванцова [9]). Этот механизм более реален в слитках промышленных размеров, так как интенсивность естественной конвекции увеличивается с увеличением размеров изложницы.

Таким образом, проблема кристаллизации отливок представляется, прежде всего, как проблема управления процессом формирования кристаллического строения отливок с целью получения заданного строения и, следовательно, заданных служебных и технологических свойств отливок.

Хорошо известно, что принудительные колебания, обеспечивающие перемешивание расплава во время кристаллизации (ультразвуковые и механические колебания, продувка газами, наложение вращающихся магнитных полей, взаимодействующих электромагнитных полей), способствуют эффективному измельчению структуры при затвердевании литых заготовок [10, 11], но механизм измельчения зерна до настоящего времени изучен недостаточно. Полагают [12-14], что при наличии колебаний зерно измельчается главным образом в результате разрушения дендритных кристаллов.

В 1878 г. Д.К. Чернов предложил идеи способов постоянного перемешивания расплава во время затвердевания его в изложнице: постоянное и сильное сотрясение изложницы, вращение изложницы с быстрым и прерывистым изменением направления [15]. Первый способ был осуществлен в 1910 г. В.В. Лермантовым и затем В.И. Тыжновым. Опыты показали значительное увеличение плотности, измельчение кристаллического зерна и улучшение свойств литой стали [16]. Второй способ был осуществлен С.Е. Розенфельдом, С.Б. Юдиным и М.М. Левиным в 1951 г. Периодическое и резкое изменение скорости вращения изложницы вызывает сильное перемешивание рас-

плава и приводит к полному уничтожению зоны столбчатых кристаллов и улучшению механических свойств отливок из аустенитных сталей [17].

Идея динамического затвердевания отливок и слитков получила практическое воплощение и в других способах перемешивания кристаллизующегося расплава: заливка в наклонную изложницу и несимметричная заливка изложниц сверху, пропускание через расплав газа, ультразвуковое воздействие [18, 19], перемешивание расплава вращающимся магнитным полем – способ, успешно использующийся сейчас при непрерывном литье слитков [20], воздействие электрического тока [21, 22] и др.

Объяснение процесса кристаллизации отливок не только при обычных условиях литья, но и при вынужденном движении расплава, независимо от способа приведения его в движение дают не все существующие на данный момент теории кристаллизации отливок и слитков. В.Д. Добаткин дает этому следующее объяснение: любое перемешивание расплава ускоряет процесс его охлаждения в форме, следовательно, ускоряется и начало равноосной кристаллизации, в результате сокращается зона столбчатых кристаллов и измельчается зерно в центральной части слитка. В.О. Гаген-Торн в своей теории предполагает, что перемешивание расплава независимо от способа перемешивания мешает образованию сплошной корки на свободной поверхности расплава, залитого в изложницу, а также на поверхности стенки изложницы. Свободные кристаллы, появляющиеся на поверхности стенок и свободной поверхности расплава, при перемешивании разносятся по всему объему расплава и являются затравками для равноосной кристаллизации.

Н.И. Хворинов [8] считает, что при перемешивании расплав разрушает фронт кристаллизации, обломки кристаллов разносятся по всему объему расплава и становятся затравками кристаллизации расплава впереди фронта кристаллизации. При увеличении интенсивности движения расплава (к примеру, за счет вибрации), число обломков возрастает, что вызывает сокращение столбчатой зоны и приводит к измельчению зерна в отливках и слитках.

По теории А. Оно [5] имеется два фактора воздействия вибрации на структуру затвердевающей отливки. Первый фактор состоит в том, что колебания способствуют смачиванию расплавом поверхности формы, а это в свою очередь облегчает теплоотвод от расплава через стенку формы. Но поскольку в обычных условиях поверхность расплава покрыта оксидными пленками, то трудно ожидать его однородного контакта с этой стенкой. Колебания разрушают покровные пленки, облегчают смачивание поверхности формы, в результате скорость охлаждения расплава увеличивается, т. е. облегчается зарождение кристаллов, вследствие этого измельчается структура наружного слоя слитков. Второй фактор заключается в том, что наложение колебаний способствует разобщению шейкообразных кристаллов со стенкой литейной формы. Если металлический расплав содержит достаточно растворенного вещества для формирования дендритных кристаллов при затвердевании, то принудительные колебания могут способствовать формированию равноосных кристаллов.

Когда металл затвердевает в вибрирующей форме, то колебания должны быть эффективны лишь постольку, поскольку они способствуют разобщению кристаллов со стенкой формы в области контакта стенки с поверхностью расплава. Если форма вибрирует во время заливки металла, то вызванное вибрацией волновое движение поверхности расплава будет способствовать разобщению кристаллов со стенкой формы до тех пор, пока не образуется стабильная твердая корочка. Так как верх твердой корочки имеет выступающую часть на уровне свободной поверхности расплава, и выступающие дендриты могут быть источником поставки равноосных кристаллов, то наложение поверхностных колебаний на расплав в форме эффективно даже в период после формирования твердой оболочки, т. е. после завершения заливки расплава.

Имеются основания предполагать, что вибрация наиболее эффективна для разобщения кристаллов со стенкой в начальный период затвердевания [5]. При вибрации у макроструктуры затвердевшего слитка появилась тенденция формирования зоны равноосных кристаллов. Металл, затвердевший в форме, которую подвергали вибрации до тех пор, пока толщина твердой корочки не достигла приблизительно 5 мм, имел такую же структуру, как и в случае застывания в вибрирующей форме в течение всего периода затвердевания. Если же форму поддерживали в стационарных условиях до тех пор, пока толщина твердой корочки не достигала ~10 мм и затем подвергали вибрации до завершения затвердевания, то в окончательной макроструктуре не наблюдали тенденции к формированию равноосной области. Структура в этом случае была подобна структуре металла, затвердевшего в стационарных условиях.

Описанные эксперименты ясно показали, что наложение вибраций наиболее эффективно в начальный период затвердевания, поскольку в этот период они стимулируют отделение кристаллов от мест их зарождения на стенке формы. Ввиду того, что отделившиеся кристаллы могут расплавляться в горячей жидкости при очень высокой температуре заливки, то вибрацию металла следует осуществлять непрерывно до тех пор, пока температура расплава не снизится до определенного уровня, при котором отделившиеся кристаллы могут сохраниться, т. е. не расплавиться полностью [5]. Кроме измельчения зерна, вибрация способствует очищению расплава от газов и твердых неметаллических включений. Д.К. Чернов указывает, что «достаточно произвести сравнительно небольшое движение расплава» для всплывания газового пузыря [15].

Процесс рафинирования алюминиевых сплавов физическими воздействиями рассмотрен в работе [23]. По мнению авторов, вибрация и ультразвук способствуют удалению из жидких силуминов водорода за счет увеличения его диффузионной подвижности в расплавах. Инерционные колебания при вибровоздействии будут передаваться пузырькам, и способствовать их удалению из расплава. Кроме того, вибрационная обработка расплава усиливает эффект модифицирования доэвтектических силуминов натрием. Предполагается, что это происходит из-за более равномерного распределения в расплаве

модифицирующих добавок. Существует и несколько других предположений, хотя единой теории пока нет.

В работе [24] экспериментально подтверждено мнение о том, что вибрационное взаимодействие на расплав связано с теплофизическими условиями его затвердевания. При формировании кристаллических структур вибрационная энергия расходуется не только на разрушение ветвей дендритов и создание в системе дополнительных центров кристаллизации, но и на повышение интенсивности теплоотвода от расплава к стенкам изложницы. Это приводит к повышению темпа кристаллизации расплава и значительному (на 25-30 %) ускорению затвердевания слитка.

В работе [25] описан разработанный станок объемной вибрации. Отливки, получаемые по предложенной технологии, имеют плотную равномерную и мелкозернистую структуру, не имеющую газовых и усадочных порков, неоднородности по химическому составу и обладает стабильно высокими прочностными и служебными свойствами. Следует отметить, что кроме вибрации и перемешивания расплава на структуру полученных слитков оказывают влияние и другие факторы: методы и способы заливки расплавов в форму, материал литейной формы, модифицирующие добавки, температура заливаемого расплава и формы и т.д.

Таким образом, вибрационный метод литья для улучшения качества отливок и слитков известен и используется уже давно. Наряду с опытами промышленного использования вибрации выполнены многочисленные исследования воздействия вибрации на строение и свойства отливок и слитков. Однако в этих исследованиях толкование существа происходящих явлений и процессов, а также практические выводы и рекомендации часто не согласуются между собой, а иногда и противоречат друг другу и требуют дополнительного теоретического и экспериментального изучения.

В целом, эти разногласия сводятся к двум точкам зрения:

1. Увеличение числа центров кристаллизации в расплаве достигается за счет механического разрушения фронта кристаллизации и разрушения дендритных осей под действием упругих сил и явления кавитации [26].

2. Увеличение скорости зарождения центров кристаллизации происходит от волнового давления и разрежения и за счет уменьшения вязкости и поверхностного натяжения расплава при вибрационном воздействии, возникновение зародышей твердой фазы происходит за счет сил вязкого трения вибрируемого расплава с растущими кристаллами [24].

Авторами в лабораторных условиях выполнено исследование влияния различных режимов вибрационной обработки расплава на плотность и твердость отливок, изготавливаемых в песчано-глинистых формах. Эксперименты проводились на образцах двух типов с приведенным размером 5 и 6 мм соответственно. В работах [27-32] доказано, что вибрация эффективно влияет на процесс кристаллизации. При этом растет скорость охлаждения отливок за счет образования более плотного контакта на границе «металл-форма», увеличивается предвсудочное расширение в литейных Al-Si сплавах за счет вы-

деления кристаллов кремния из жидко-твердой области в твердо-жидкую область. Отливки, полученные с наложением вибрации на кристаллизующийся расплав, имеют плотную, равномерную и мелкозернистую структуру. Экспериментально установлено, что для отливок диаметром 30 мм из доэвтектических алюминиевых сплавов наиболее оптимальной является резонансная частота 50 Гц. Установлено, что вибрационное воздействие с оптимальными параметрами эффективно влияет на процесс кристаллизации алюминиевых сплавов. В частности, зерно измельчается на 25-40 %, твердость по Бринеллю возрастает на 6-14 %, относительное удлинение возрастает на 30-42 %, предел прочности на растяжение возрастает на 6-15 %. Исследования показали, что виброобработка на оптимальных резонансных частотах позволяет повысить плотность сплава на 8-12 % и снизить процент брака по герметичности отливок с 15 до 7 %.

Следует отметить, что наложение внешних физических воздействий на расплавы может быть перспективным направлением повышения качества литейных металломатричных композитов [33-35]. Предполагается, что обработка композиционных расплавов в процессах плавки и литья позволит обеспечить заданную степень межфазного взаимодействия между матрицей и экзогенной армирующей фазой, диспергирование эндогенных армирующих фаз, а также равномерное распределение армирующих компонентов по объему расплава и, соответственно, литой заготовки.

**Выводы:** Комплексное исследование процессов кристаллизации и затвердевания сплавов, обработанных внешними воздействиями (вибрацией, ультразвуком, электрическими и магнитными поля и т.д.), будет способствовать развитию фундаментального понимания механизмов кристаллизации и модифицирования сплавов и композитов для целенаправленного управления формированием структуры отливок и слитков, а также позволит разрабатывать ресурсоэффективные технологии получения высококачественных литых изделий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D.M. Stefanescu. Science and Engineering of Casting Solidification. 3rd ed. Springer International Publishing AG Switzerland (2015) 559 p.
2. J. A. Dantzig, M. Rappaz. Solidification. Taylor & Francis Group, CRS Press (2009) 621 p.
3. J. Campbell. Casting. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Elsevier (2003) 335 p.
4. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок. Чистые металлы и однофазные сплавы. М.: Машиностроение. – 1965. – 256 с.
5. Оно А. Затвердевание металлов. Пер. с англ. М.: Metallurgia, 1980. – 152 с.
6. Саратовкин Д.Д. Дендритная кристаллизация. М.: Metallurgizdat. – 1957. – 128 с.
7. Добаткин В.И. Слитки алюминиевых сплавов. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 175 с.
8. Хворин Н.И. Кристаллизация и неоднородность стали. – М.: Metallurgia, 1958. – 140 с.

9. Иванцов Г.П. К вопросу о возможности «дождя» кристаллов в стальном слитке // *Сталь*. – 1952. – № 10. – С. 922-931.
10. Deev V.B., Belov N.A., Selyanin I.F., Kutsenko A.I., Ponomareva K.V. Promising resource saving technology for processing melts during production of cast aluminum alloys // *Metallurgist*. 2015. Т. 58. № 11-12. С. 1123-1127.
11. Деев В.Б., Селянин И.Ф., Нохрина О.И., Башмакова Н.В. Влияние температурной обработки и электрического тока на свойства алюминиевых сплавов // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2008. – № 4. – С. 50-53.
12. Wang X., Luo X., Cong F., Cui J. Research progress of microstructure control for aluminium solidification process // *Chinese Science Bulletin* (2013), 58, 468–473.
13. Deev V.B., Prusov E.S., Kutsenko A.I. Theoretical and Experimental Evaluation of the Effectiveness of Aluminum Melt Treatment by Physical Methods // *Metallurgia Italiana* (2018), 110(2), 16-24.
14. Vorozhtsov S., Kudryashova O., Promakhov V., Dammer V., Vorozhtsov A. Theoretical and experimental investigations of the process of vibration treatment of liquid metals containing nanoparticles // *JOM* (2016), 68, 3094–3100.
15. Труды Д.К. Чернова. Под редакцией Н.Т. Гудцова. – М.: Металлургиздат, 1950. – 564 с.
16. Тыжнов В.И. Кремневосстановительный мартеновский процесс. ОНТИ. – 1936. – 348 с.
17. Розенфельд С.Е., Юдин С.Б., Левин М.М. О методах динамического воздействия на кристаллизацию отливок // *Литейное производство*. – 1957. – № 11. – С. 24-26.
18. Цуркин В.Н., Грабовый В.М. Оценка эффективности внешнего физического воздействия при внепечной обработке расплава // *Литейное производство*. – 2003. – № 10. – С. 29-31.
19. Eskin D.G. Ultrasonic processing of molten and solidifying aluminium alloys: overview and outlook // *Materials Science and Technology* (2017), 33, 636-645.
20. Борисов В.Г. Управление структурой и свойствами алюминиевых сплавов в условиях специальных способов литья // *Литейное производство*. – 2000. – № 7. – С. 39-42.
21. Рыбкин В.А., Тимченко С.Л. Кристаллизация алюминиевых сплавов под действием электрического тока // *Литейное производство*. – 2003. – № 10. – С. 17-19.
22. Калюкин Ю.Н. Моделирование направленного затвердевания отливки из жаропрочного сплава под действием электрического тока. // *Известия ВУЗов. Черная металлургия*. – № 11. – 2002. – С. 48-52.
23. Иванцов А.А., Крушенко Г.Г. О механизме влияния упругих колебаний на алюминиево-кремниевые сплавы // *Литейное производство*. – 2003. – № 2. – С. 2-4.
24. Найдек В.Л., Эльдарханов А.С., Нурадинов А.С., Таранов Е.Д. О механизме воздействия вибрации на кристаллизацию и структурообразование сплавов // *Литейное производство*. – 2003. – № 9. – С. 13-15.
25. Чебышев В.А. Станок объемной вибрации // *Литейное производство*. – 2003. – № 7. – С. 21-22.

26. Батышев А.И. Кристаллизация металлов и сплавов под давлением. – М.: Металлургия. – 1977. – 152 с.
27. Результаты исследования механических свойств и микроструктуры валков производства ОАО «КМК» / А.И. Куценко, С.В. Морин, Р.М. Хамитов, О.Г. Приходько, С.А. Тимонин // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей ред. Кулакова С. М. / Новокузнецк: СибГИУ, 2002. – Вып. 6. – 463 с.
28. Контактное взаимодействие отливка-форма под действием вибрации / И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, С.В. Морин, Р.М. Хамитов, О.Г. Приходько // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей ред. Кулакова С.М. / Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – Вып. 8. – С. 243.
29. Жидкотекучесть алюминиево-кремниевых сплавов под действием вибрации / И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, С.В. Морин, Р.М. Хамитов, О.Г. Приходько // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения. Труды региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Под общей ред. Кулакова С. М. / Новокузнецк: СибГИУ, 2004. – Вып. 8. – С. 244.
30. Исследование тепловых флуктуаций на фронте кристаллизации при затвердевании чугуновых прокатных валков ОАО «КМК» методом ДТА / И.Ф. Селянин, А.И. Куценко, О.Г. Приходько, Р.М. Хамитов, С.В. Морин // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств: Сб. науч. тр. / Под ред. В.А. Маркова и А.М. Гурьева – Вып. 6. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. С. 98-100.
31. Особенности модифицирующей обработки металлических расплавов вибрацией и ультразвуком / И.Ф. Селянин, В.Б. Деев, А.И. Куценко, О.Г. Приходько, О.В. Махина // Вестник горно-металлургической секции РАЕН: сб. науч. тр. Вып. 31. – Москва-Новокузнецк: СибГИУ, 2013. – С. 49-52.
32. Selyanin I.F., Deev V.B., Belov N.A., Prikhodko O.G. Physical modifying effects and their influence on the crystallization of casting alloys // Russian Journal of Non-Ferrous Metals (2015), 56, 434-436.
33. Прусов Е.С., Деев В.Б., Рахуба Е.М. Влияние температурно-временной обработки расплава на структуру и свойства эвтектических композитов системы Al-Si-Mg // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. – 2017. – № 39. – С. 170-174.
34. Прусов Е.С., Панфилов А.В., Панфилов А.А. Термодинамический анализ и модель взаимодействия компонентов при синтезе композиционных материалов на основе систем Al-TiO<sub>2</sub>-B-SiC и Al-TiO<sub>2</sub>-C-SiC // Литейщик России. – 2009. – № 9. – С. 30-33.
35. Панфилов А.В., Прусов Е.С. О получении и свойствах комплексно-армированных композиционных материалов с алюминиевой матрицей // Литейное производство. – 2008. – № 8. – С. 1-9.