

УДК 669.715:669.788

**Ф. М. Котлярский**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТОГО МЕТАЛЛА И ФОРМИРОВАНИЕ ОТЛИВКИ

*Показано неоднозначное влияние структуры на качественные и технико-экономические показатели производства отливок. С учетом мнения известных специалистов сформулирована главная задача литейщиков-исследователей: разработка способов получения отливок, отвечающих заданным требованиям, при минимальных затратах материалов, энергии и труда. Исследования структуры целесообразны в случаях, когда они обоснованы достижением того же результата.*

**Ключевые слова:** отливки, слитки, структура, механические свойства, затраты ресурсов, неоднозначность влияния, задачи литейщиков.

*Показано неоднозначний вплив структури на якісні та техніко-економічні показники виробництва виливків. З урахуванням поглядів відомих фахівців сформульовано головну задачу ливарників-дослідників: розробка способів одержання виливків, які відповідають заданим вимогам, при мінімальних витратах матеріалів, енергії і праці. Дослідження структури доцільні в випадках, коли вони обгрунтовані досягненням того ж результату.*

**Ключові слова:** виливки, зливки, структура, механічні властивості, витрати ресурсів, неоднозначність впливу, задачі ливарників.

*It was shown an ambiguous effect of the structure on qualitative engineering-and-economical performance of castings production. Taking into account the opinions of renowned experts it was formulated the main task of foundryman-researcher, such as: development of methods for the preparation of castings that meet the specified requirements by the lowest cost of materials, energy and labor. Researching of the structure is suitable in cases where they are validated by achieving the same result.*

**Keywords:** casts, ingots, structure, mechanical properties, resource costs, the impact ambiguity, casters problem.

**В** процессе развития литейного производства было замечено неоднозначное влияние структуры, особенно в части размеров первичного кристаллического зерна, на качественные и технико-экономические показатели производства выпускаемой продукции. Соответственно вырабатывалось и отношение к структуре.

Б. Б. Гуляев считал, что основная задача теории литейных процессов состоит в разработке способов получения отливок и слитков, отвечающих заданным требо-

ваниям по качеству, при минимальных затратах материалов, энергии и труда [1]. При этом качество литого материала определяется по его механическим свойствам; кроме того, в отдельных случаях применяются дополнительные методы контроля: оценка структуры, испытание устойчивости против коррозии и др. [2, с. 196].

В. А. Ефимов в своей главной работе [3, с. 183], опубликованной в 1976 г., считал, что основная задача, решаемая литейщиками, заключается в получении однородных по составу, кристаллическому строению и механическим свойствам отливок и слитков. Однако, в 1995 г. в монографии [4, с. 78] он переходит на позицию Б. Б. Гуляева и исключает из своей формулировки «...кристаллическое строение...».

Тем не менее, структуру алюминиевых сплавов в ряде работ [5, 6] считают важным показателем качества литого изделия, полагая, что чем мельче зерно, тем выше механические свойства.

Монография Г. Ф. Баландина [7], специально посвященная формированию кристаллического строения отливок, в основном из алюминия и его сплавов, начинается со слов [с. 3]: «Убедительно доказано, что решающее влияние на свойства отливок оказывают размер и форма кристаллических зерен». К сожалению, ссылок нет. А в заключении сказано: «Проблема кристаллизации отливок и слитков с точки зрения современных задач литейного производства и металлургии, есть, прежде всего, проблема управления процессом формирования кристаллического строения реальных отливок и слитков с целью повышения конструктивных, технологических и служебных свойств литого металла» [с. 236]. Прямых подтверждений этому в книге нет. Есть влияние вибрации (с. 194, табл. 2 и 3) и ультразвука (с. 218, табл. 5) на механические свойства, но без указания структуры и пористости.

Есть и другие мнения. Согласно справочнику Л. Ф. Мондольфо [8, с. 470, 477] для алюминиево-кремниевых сплавов размер зерна даже при модифицировании титаном и бором не очень важен, так как их механические свойства определяются главным образом количеством и структурой кремния, что достигается действием присадок натрия и фосфора. Влияние размера ячеек и расстояния между ветвями дендритов на механические свойства сплавов с содержанием кремния больше 8 % также не очень заметно. А в работе Н. Н. Белоусова [9, с. 283] добавка церия в алюминиево-магниевого сплава привела к заметному измельчению структуры, однако влияние на механические свойства оказалось отрицательным.

Аналогичные примеры можно привести применительно к стали. В работе Б. Б. Гуляева [10, с. 33, 34] эксперименты показали, что нет никакой связи между модифицирующим воздействием добавок на измельчение структуры и воздействием на механические свойства. В ряде случаев обработка сильными модификаторами приводит к ухудшению пластичности и вязкости. Н. И. Хворинов [11] также не поддерживает стремление к получению мелких первичных зерен.

Помимо механических свойств структура является фактором формирования затвердевающих отливок.

*Строение двухфазной области* [2, 12]. Если кристаллизация будет происходить в форме разветвленных дендритов, связанный скелет между ними образуется быстро и граница выливаемости (фронт твердо-жидкого состояния) будет располагаться вблизи границы ликвидус, к ней будет примыкать и граница питания. Если кристаллизация будет происходить в глобулярной форме, границы выливаемости и питания будут располагаться вблизи границы солидус [2, с. 106].

Для одного и того же сплава критическая концентрация твердой фазы зависит от величины зерна. Так, например, бронза Бр010 с мелкозернистой структурой проявляет склонность к движению двухфазной массы при 55-60 % твердой фазы, а при крупнозернистой столбчатой структуре – не более 15-20 % [12]. В заэвтектическом силумине при 22 % Si стадия фильтрационного питания составляла 43 %. Повышение перегрева сокращало, а модифицирование стронцием удлиняло эту стадию.

*Заполняемость формы расплавом.* При заполнении под низким давлением каналов литейной формы под действием напора потока происходит частичное

разрушение ветвей кристаллов с выносом обломков в головную часть потока, где они выступают в роли дополнительных центров кристаллизации, способствуя образованию «пробки», останавливающей поток [13, с. 175], что в плане заполняемости формы может оказаться преждевременным. Ведь известно [14, с. 32], что при крупнозернистой структуре после смыкания растущих от стенок формы литейных корочек наблюдается еще некоторое увеличение длины потока за счет фильтрации расплава.

При литье сплавов в твердожидком состоянии заполнение формы будет происходить легче, с меньшими сдвиговыми нагрузками, при мелких и крупных зернах ( $<0,7-0,5$  мм и  $>4$  мм). Сплав со средним размером зерен заполняется хуже, так как требует больших напоров для движения путем сдвига [12, с. 49].

*Питание затвердевающей отливки.* Соотношение между различными механизмами питания зависит, прежде всего, от размера кристаллитов. Вероятно, при ячеистой и столбчатой структуре питание будет носить лишь фильтрационный характер. Можно предположить, что при крупнозернистом строении наблюдается большая склонность к фильтрационному питанию, а при малом зерне сплава – к суспензионному. До размера зерен 2,5-4 мм происходит сдвиг всей зернистой твердожидкой массы под действием металлостатического напора, а начиная с этого размера преобладает фильтрационный характер движения расплава [12, с. 46-49].

При наиболее часто встречающемся дендритном строении кристаллитов движение ликвата (питающего расплава) происходит между отдельными дендритами и ветвями дендритов. В зависимости от характера формирующейся структуры, от морфологии кристаллизующегося сплава различны длительность, интенсивность и полнота фильтрационного питания.

При направленной кристаллизации сплава фильтрационный механизм питания является практически единственным механизмом перемещения сплава для компенсации усадки при затвердевании, поскольку суспензионный механизм питания присущ только равноосной морфологии кристаллизующегося сплава [12, с. 94].

Ячеистый фронт затвердевания, который наглядно можно представить как пучок карандашей, все заостренные концы которых обращены в сторону жидкой фазы, приобретает все признаки фильтрационного питания. При переходе ячеистого фронта к дендритному в значительной мере возрастает гидравлическое сопротивление фильтрационного потока из-за возросших неровностей на поверхности дендритных образований, из-за переплетения дендритных ветвей от осей второго, третьего и более высоких порядков. При формировании равноосной кристаллической структуры фильтрационное питание литой заготовки является обычно второй фазой питания и наступает после прекращения суспензионного питания. Момент перехода от суспензионного движения сплава к фильтрационному зависит от морфологии равноосной структуры, в частности от размеров безразлично ориентированных кристаллитов. Для крупнокристаллической структуры процесс фильтрационного питания более длителен, наступает при меньшем содержании твердой фазы в суспензии и протекает более эффективно.

Коэффициент проницаемости для равноосной структуры, если принять, что кристаллиты имеют шаровую форму, определяется по формуле Лейбензона:

$$K_n = n^2 d^2 / 48(1 - m)$$

где  $d$  – диаметр кристаллита;  $m$  – относительная пористость ( $m = 0,25$ );  $n$  – просвет, не зависящий от диаметра шара ( $n = 0,0931$ ). То есть, коэффициент проницаемости, определяющий условия фильтрационного питания, пропорционален диаметру кристаллита в квадрате [12, с. 95-98].

При одинаковой площади сечения жидкой фазы меньшую проницаемость будет иметь кристаллический каркас того сплава, который образует более разветвленную

## Кристаллизация и структурообразование сплавов

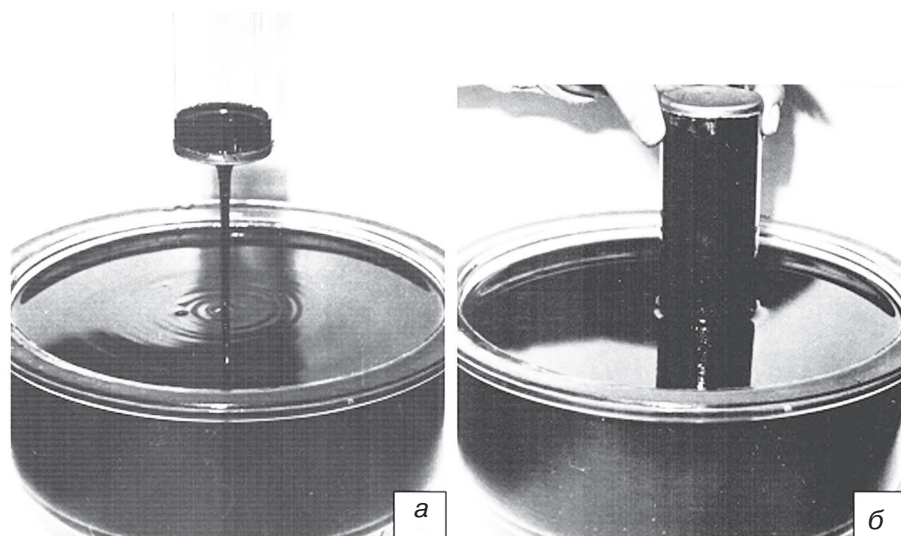
двухфазную зону с большим количеством междендритных каналов [15, 16]. Замечено также [15], что чем быстрее кристаллизуется сплав, тем ниже его проницаемость при данной температуре.

Наиболее трудны для питания в двухфазном состоянии сплавы со средней величиной зерна от 0,5 до 3 мм [12, с. 86].

При крупнозернистой структуре после смыкания растущих от стенок формы литейных корочек наблюдается еще некоторое увеличение длины потока за счет фильтрации расплава [14, с. 32], что расширяет возможности фильтрационного питания.

В жидких алюминиевых сплавах всегда имеется какое-то количество растворенного водорода, который в процессе заливки (снятие перегрева) и особенно при затвердевании (перераспределение между твердой и жидкой фазой) выделяется из раствора с образованием газовых пузырьков. Если размеры пузырьков больше размеров междендритных каналов, происходит закупорка этих каналов пузырьками и прекращается поступление через них питающего расплава на более удаленные от прибыли участки отливки.

Для моделирования этого явления [17, с. 28] в качестве сплошной сетки кристаллов использовали обычную хлопчатобумажную ткань. Затвердевшую корочку отливки представляла прозрачная стеклянная трубка, а в качестве расплава применяли подкрашенную воду. Как показано на рис., а, жидкость проходит сквозь затопленную тканевую сетку даже при самом незначительном гидростатическом напоре. Иная картина наблюдается при расположении сетки ткани над жидкостью (рис., б): вода не опускается до тех пор, пока величина напора не станет больше капиллярных сил, возникающих в открытых сверху ячейках сетки. Не трудно представить, что каждая ячейка сетки закупорена газовым (в данном случае воздушным) пузырьком. Естественно, чем мельче зерно и, соответственно, междендритные каналы, тем больше капиллярные силы и тем хуже условия питания отливки.



Моделирование влияния капиллярных сил на процесс фильтрации

Следует отметить неоднозначность оценки роли размеров кристаллического зерна в процессах питания затвердевающих отливок.

По мнению одних авторов [18, 19-21] измельчение кристаллов облегчает питание. Однако, с противоположной точки зрения [22, 23], между крупными кристаллами находятся поры больших размеров, через которые легче фильтруется питающая жидкость. Существует и третье мнение, согласно которому наиболее трудны для

питания в двухфазном состоянии сплавы со средней величиной зерна – от 0,5 до 3 мм [12]. Случается, что в одной работе при исследовании различных по составу сплавов часть результатов подтверждает одну точку зрения, часть – другую [22].

*Образование утяжин.* На отливках с мелким зерном утяжины выглядят как неглубокие, но большие по площади вмятины по поверхности, тогда как у крупнозернистой отливки эти утяжины занимают меньшую площадь и похожи на глубокие переплетенные трещины и каналы, по которым в конце затвердевания уходили остатки жидкого металла вглубь отливки под действием атмосферного давления [24].

*Расседоточение концентрированной усадочной раковины.* Установлено [24, 25], что по отношению к алюминиево-кремниевым сплавам эффект модифицирования проявляется главным образом в расседоточении концентрированной усадочной раковины и формировании развитой микропористости, что подтверждается результатами экспериментальных исследований на сплавах АЛ30 (флюсовой модификатор 40%NaF+45%NaCl+ 15%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) и Al+21%Si (модификатор пятихлористый фосфор). При этом существенно повышаются физико-механические свойства получаемых из этих сплавов отливок.

*Реология.* Обнаружена закономерность: чем меньше размер кристаллитов, тем при более высоком содержании твердой фазы сохраняются оптимальные реологические свойства, определяющие склонность сплавов к движению в двухфазном состоянии [12, с. 122].

Перемещение твердожидкого сплава путем сдвига или фильтрации лучше, то есть при меньших напорах, происходит с очень мелкими и крупными зернами (<0,7-0,5 мм и >4,0 мм). Сплав со средним размером зерен (от 0,5 до 4,0 мм) хуже, так как требует больших напоров для движения путем сдвига в твердожидком состоянии. Следовательно, сплавы со средними размерами литого зерна являются более трудными для питания и более предрасположены к транзитивной пористости. Поэтому для некоторых сплавов модифицирование, сопровождающееся измельчением зерна, приводит к повышению пористости и снижению герметичности отливки [12, с. 49].

Вязкость почти линейно возрастает с увеличением размера зерна. Предельное напряжение сдвига резко возрастает от нуля при отсутствии твердых зерен до среднего размера 0,3 мм (0,2-0,5 мм), затем рост замедляется, а начиная с 3 мм этот параметр снова возрастает [12, с. 82].

А. А. Рыжиков [31, с. 409] и И. Б. Куманин [32, с. 64] для оценки вязкости  $\eta_1$  металлических суспензий используют формулу А. Эйнштейна  $\eta_1 = \eta(1+2,5\varphi)$ , где  $\varphi$  – содержание дисперсной фазы,  $\eta$  – вязкость при  $\varphi = 0$ . А. А. Рыжиков обратил внимание на то, что вязкость системы, судя по формуле, не зависит от размеров твердых частиц, и внес поправку. Так как твердые частицы в металле обладают способностью к взаимодействию с жидкой средой, то можно полагать, что на них будет находиться некоторый слой жидкости, прочно связанный с ними. Таким образом, суспензия будет вести себя так, как будто бы в ней содержится больше твердой фазы, чем это соответствует равновесному состоянию. Принимая толщину слоя жидкости, связанной с частицей, не зависящей от радиуса частицы, несложный расчет привел к ожидаемому выводу, что чем мельче частицы, тем больше вязкость суспензии.

*Возникновение дефектов в виде несплошностей.* При кристаллизации отливок с равноосной структурой легче всего дефекты могут образоваться в высококонцентрированной суспензии, когда отливка из жидко-подобного состояния переходит в твердо-подобное. Это происходит, если количество твердой фазы превышает 50 %, и зависит от размеров и формы зерен. Именно на этой стадии усугубляются возможности образования микротрещин, пор и других несплошностей, снижающих основные эксплуатационные свойства. А возникают эти несплошности при взаим-



ном перемещении зерен под действием давления, вибрации или напряжений от затрудненной усадки.

Структура, зерна которой полностью окружены тонкими оболочками жидкой фазы, не может выдерживать значительных напряжений и приводит к типичному интеркристаллитному разрушению. Образующиеся микротрещины и надрывы при перемещениях для компенсации усадки или от вибрации не всегда могут завариться и остаются в твердом материале, вызывая течь при испытании давлением и снижая механические свойства.

По-иному обстоит дело, если малое количество жидкого сплава эвтектического состава или сплава второй фазы не обволакивает твердые зерна, а располагается между ними в виде отдельных изолированных участков. В этом случае зерна соприкасаются друг с другом своими гранями, образуя жесткую систему, которая значительно устойчивее по отношению к действующим напряжениям от усадки, вибрации, металлостатического или иного давления. В этом случае образуются разобщенные поры (часто овальной формы), которые незначительно влияют на появление течи и механические свойства сплава [12, с. 33-35].

Плотность сплава с направленной дендритной структурой ниже, чем плотность сплава с направленной ячеистой структурой [12, с. 95].

*Механические свойства пористых отливок.* Положительное действие измельчения зерна на механические свойства пораженных пористостью отливок в большей степени зависит от строения сплава. Так, в сплавах, имеющих значительные количества хрупких химических соединений или эвтектик по границам зерен, частичная замена этих хрупких отложений усадочными порами будет мало влиять на механические свойства. Но если в сплаве отсутствуют хрупкие межкристаллические составляющие, то влияние измельчения зерна будет очень заметным: в этом случае усадочные поры нарушают сплошность пластичной основы, поэтому раздробление усадочных пор при измельчении зерна окажет, безусловно, положительное действие [24, с. 231].

Рафинирование алюминиевых сплавов, как правило, сопровождается укрупнением зерна [12, 26, 27-29], что неблагоприятно отражается на технологических и эксплуатационных свойствах. С измельчением зерна измельчается пористость, а это благоприятно влияет на механические свойства [24, 30].

Из выполненного обзора следует, что главной задачей литейщика-исследователя является разработка способов получения отливок, отвечающим заданным требованиям, при минимальных затратах материалов, энергии и труда. Исследования структуры целесообразны в тех случаях, когда они обоснованы возможностью достижения того же результата. При этом нужно учитывать влияние структуры как на механические свойства литого металла, так и на процессы формирования отливки.



### Список литературы

1. Гуляев Б. Б. // Процессы литья. – 1990. – № 2. – С.1-3.
2. Гуляев Б. Б. Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
3. Ефимов В. А. Разливка и кристаллизация стали. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
4. Ефимов В. А., Эльдарханов А. С. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов. – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.

5. Афанасьев В. К., Никитин В. И. Структура и свойства алюминиевых сплавов в зависимости от условий подготовки шихтовых материалов // Литейн. про-во. – 1976. – № 4. – С. 16-17.
6. Золотаревский В. С., Карнаухов А. С. О связях между механическими свойствами и структурными характеристиками литых сплавов алюминий-магний // Изв. вузов. Цв. металлургия. – 1976. – № 1. – С. 113-120.
7. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливок. – М.: Машиностроение, 1965. – 256 с.
8. Моңдольфо Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
9. Белоусов Н. Н., Додонов А. А. Кристаллизация отливок из цветных сплавов в условиях приложения давления // Кристаллизация металлов. – М.: АН СССР, 1960. – С. 279-297.
10. Гуляев Б. Б. Кристаллизация металлов // Кристаллизация металлов. М.: АН СССР, 1960. – С. 5-34.
11. Хворинин Н. И. Структурообразование стали // Кристаллизация металлов. – М.: АН СССР, 1960. – С. 108-111.
12. Тимофеев Г. И. Механика сплавов при кристаллизации слитков и отливок. – М.: Металлургия, 1977. – 160 с.
13. Борисов Г. П. Давление в управлении литейными процессами. – К.: Наукова думка, 1988. – 272 с.
14. Шнитко В. К., Борисов Г. П. К вопросу о характере затвердевания потока расплава в цилиндрическом канале металлической формы // Литье под регулируемым давлением. – К.: ИПЛ АН УССР, 1980. – С. 23-41.
15. Колядина Н. Ю., Матвеев Ю. Е., Борисов В. Т. Исследование течения междендритной жидкости в двухфазной зоне металлических сплавов // Изв. вузов. Чер. Металлургия. – 1981. – С. 123-126.
16. Шейдеггер А. Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. – М.: Гостоптехиздат, 1960. – 249 с.
17. Котлярский Ф. М. Формирование отливок из алюминиевых сплавов. – К.: Наукова думка, 1990. – 216 с.
18. Магницкий О. Н., Гуляев Б. Б. Влияние условий затвердевания на формирование усадочных раковин в стальных отливках // Усадочные процессы в металлах. – М.: АН СССР, 1980. – С. 19-31.
19. Ефимов В. А. Влияние некоторых особенностей затвердевания на развитие химической и физической неоднородности сплавов // Пробл. стального слитка. – 1976. – № 6. – С. 12-22.
20. Drossel G., Maj R., Liesenberg O. Der Einflusse von Schmelzbehandlung am die Dichtheit von Gusskorpern aus Aluminium – Silizium – Gusslegierungen // Giessereitechnik. – 1981. – N 6. – P. 167-170.
21. Davies V. de L. Feeding Range Determination by numerically computed Heat Distribution // Cast Metals Research J. – 1975. – 11, N 2. – P. 33-34.
22. Siegrfid E., Leonhard H. Interdendritische speisung und warmrissverhalten am Beispiel von Aluminium - Silicium – Legierungen // Giessereiforschung. – 1973. – 25, N 3. – P. 101-113.
23. Вейник А. И. Теория затвердевания отливки. – М.: Машгиз, 1960. – 435 с.
24. Мерфи А. Дж. Плавка и литье цветных металлов и сплавов. – М.: Металлургиздат, 1959. – 646 с.
25. Корякин Г. И., Кимстач Г. М. Исследование влияния эффекта модифицирования на изменение составляющих суммарной усадки Al-Si сплавов // Тр. Горьк. ПКТИ. – 1970. – Вып. 1. – С. 68-75.
26. Добаткин В. И., Габидуллин Р. М., Колачев Б. А., Макаров Г. С. Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах. – М.: Металлургия, 1976. – 263 с.
27. Кулагина Е. Н. Рафинирование алюминиевых сплавов и контроль качества по структурной пробе // Цветное литье. – М.: Машгиз, 1954. – С. 21-37.
28. Спасский А. Г., Клягина Н. С. Очистка металлов от неметаллических включений // Литейное про-во. – 1959. – № 4. – С. 30-32.
29. Курдюмов А. В., Инкин С. В. Влияние технологии плавки и литья на качество и свойства алюминиевых сплавов // Цветные металлы. – 1981. – № 6. – С. 94-97.
30. Сокольская Л. Н. Газы в легких металлах. – М.: Металлургиздат, 1959. – 115 с.
31. Рыжиков А. А. Теоретические основы литейного производства. – М.: Свердловск: Машгиз, 1961. – 448 с.
32. Куманин И. Б. Вопросы теории литейных процессов. – М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.



## References

1. Guliaev B. B. (1990). Protcessy litia. № 2, pp. 13.
2. Guliaev B. B. (1976). Teoriia liteinykh protcessov. [*Theory of casting processes*]. Leningrad: Mashinostroenie.
3. Efimov V. A. (1976). Razlivka i kristallizatsiia stali. [*Casting of steel and crystallization*]. Moscow: Metallurgiiia.
4. Efimov V. A., Eldarkhanov A. S. (1995). Fizicheskie metody vozdeistviia na protcessy zatverdevaniia splavov. [*Physical methods of influence on the solidification process of alloys*]. Moscow: Metallurgiiia.
5. Afanasev V. K., Nikitin V. I. (1976). Struktura i svoistva aliuminievykh splavov v zavisimosti ot uslovii podgotovki shikhtovykh materialov. [*The structure and properties of aluminum alloys according to the preparation conditions of the charge materials*]. Liteinoie proizvodstvo. № 4, pp.16-17.
6. Zolotarevskii V. S., Karnaukhov A. S. (1976). O sviaziakh mezhdu mekhanicheskimi svoistvami i strukturnymi kharakteristikami litykh splavov aliuminiimagnii. [*On the connections between the mechanical properties and structural characteristics of cast alloys aluminum-magnesium*]. Izv. vuzov. Tsvetnaia metallurgiiia. № 1, pp.113-120.
7. Balandin G. F. (1965). Formirovanie kristallicheskogo stroeniia otlivok. [*Formation of the crystalline structure of castings*]. Moscow: Mashinostroenie.
8. Mondolfo L. F. (1979). Struktura i svoistva aliuminievykh splavov. [*The structure and properties of aluminum alloys*]. Moscow: Metallurgiiia.
9. Belousov N. N., Dodonov A. A. (1960). Kristallizatsiia otlivok iz tsvetnykh splavov v usloviakh prilozheniia davleniia. [*Crystallization castings of nonferrous alloys under pressure applications*]. Kristallizatsiia metallov. Moscow: AN SSSR, pp. 279-297.
10. Guliaev B. B. (1960). Kristallizatsiia metallov. [*Crystallization of metal*]. Kristallizatsiia metallov. Moscow: AN SSSR, pp. 5-34.
11. Khvorinov N. I. (1960). Strukturoobrazovanie stali. [*Structurization steel*]. Kristallizatsiia metallov. Moscow: AN SSSR, pp.108-111.
12. Timofeev G. I. (1977). Mekhanika splavov pri kristallizatsii slitkov i otlivok. [*Mechanics alloys at crystallization of ingots and castings*]. Moscow: Metallurgiiia.
13. Borisov G. P. (1988). Davlenie v upravlenii liteinymi protcessami. [*Pressure casting process in managing*]. Kiev: Naukova dumka.
14. Shnitko V. K., Borisov G. P. (1980). K voprosu o kharaktere zatverdevaniia potoka rasplava v tsilindricheskoi kanale metallicheskoi formy. [*On the question of the nature of the hardening melt flow in a cylindrical channel metal mold*]. Lite pod reguliruemym davleniem. Kiev: IPL AN USSR, pp. 23-41.
15. Koliadina N. Yu., Matveev Yu. E., Borisov V. T. (1981). Issledovanie techeniia mezhdendritnoi zhidkosti v dvukhfaznoi zone metallicheskikh splavov. [*Investigation of the two-phase zone mezhdendritnoy zhidkosti in metal alloys*]. Izv.vuzov. Chernaia metallurgiiia, pp.123-126.
16. Sheidegger A. E. (1960). Fizika techeniia zhidkosti cherez poristyie sredy. [*The physics of flow of fluids through porous media*]. Moscow: Gostoptekhizdat.
17. Kotliarskii F. M. (1990). Formirovanie otlivok iz aliuminievykh splavov. [*Formation of casts from aluminum alloys*]. Kiev: Naukova dumka.
18. Magnitckii O. N., Guliaev B. B. (1980). Vliianie uslovii zatverdevaniia na formirovanie usadochnykh rakovin v stalnykh otlivkakh. [*Influence of curing conditions on the formation of cavities in steel castings*]. Usadochnye protcessy v metallakh. Moscow: AN SSSR, pp.19-31.
19. Efimov V. A. (1976). Vliianie nekotorykh osobennosti zatverdevaniia na razvitie khimicheskoi i fizicheskoi neodnorodnosti splavov. [*Influence of some features of solidification on the development of chemical and physical inhomogeneity of alloys*]. Probl. stalnogo slitka. № 6, pp.12-22.
20. Drossel G., Majr., Liesenberg O. (1981). Der Einfluse von Schmelzehandlung am die Dichtheit von Gusskorporen aus Aluminium – Silizium – Gusslegierungen. Giessereitechnik. N 6, pp.167-170.
21. Davies V. de L. (1975). Feeding Range Determination by numerically computed Heat Distribution. Cast Metals Research J. 11, N 2, pp. 33-34.
22. Siegfried E., Leonhard H. (1973). Interdendritische speisung und warmrissverhalten am Beispiel von Aluminium Silicium – Legierungen. Giessereiforschung. 25, N 3, pp. 101-113.



23. Veinik A. I. (1960). Teoriia zatverdevaniia otlivki. [*The theory of cast solidification*]. Moscow: Mashgiz.
24. Merfi A. Dzh. (1959). Plavka i lite tsvetnykh metallov i spлавov. [*Melting and casting of non-ferrous metals and alloys*]. Moscow: Metallurgizdat.
25. Koriakin G. I., Kimstach G. M. (1970). Issledovanie vliianiia efekta modifitsirovaniia na izmenenie sostavliaiushchikh summarnoi usadki AlSi сплавov. [*Investigation of the effect of modifying the effect of a change in the total shrinkage in Al-Si alloys*]. Tr. Gork. PKTI. Issue 1, pp. 68-75.
26. Dobatkin V. I., Gabidullin R. M., Kolachev B. A., Makarov G. S. (1976). Gazy i okisly v aluminievyykh deformiruemykh сплавakh. [*The gases and oxides in wrought aluminum alloys*]. Moscow: Metallurgiya.
27. Kulagina E. N. (1954). Rafinirovanie aluminievyykh сплавov i kontrol kachestva po strukturnoi probe. [*Refining aluminum alloys and quality control for sample structure*]. Tsvetnoe lite.: Moscow: Mashgiz, pp. 21-37.
28. Spasskii A. G., Kliagina N. S. (1959). Ochistka metallov ot nemetallimcheskikh vklucheni. [*Cleaning metals from non-metallic inclusions*]. Liteinoe proizvodstvo. № 4, pp. 30-32.
29. Kurdiunov A. V., Inkin S. V. (1981). Vliianie tekhnologii plavki i litia na kachestvo i svoystva aluminievyykh сплавov. [*Effect of melting and casting technology on the quality and properties of aluminum alloys*]. Tsvetnye metally. № 6, pp. 94-97.
30. Sokolskaia L. N. (1959). Gazy v legkikh metallakh. [*Gases in light metals*]. Moscow: Metallurgizdat.
31. Ryzhikov A. A. (1961). Teoreticheskie osnovy liteinogo proizvodstva. [*Theoretical foundations of foundry*]. Moscow-Sverdlovsk: Mashgiz.
32. Kumanin I. B. (1976). Voprosy teorii liteinykh protsessov. [*Problems in the theory of foundry processes*]. Moscow: Mashinostroenie.

Поступила 11.10.2016

### Вниманию авторов!

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь название статьи, ФИО авторов, аннотации, ключевые слова на русском, украинском и английском языках, а также список литературы на английском языке, согласно международным требованиям. Объём статьи — не более **10 стр.**, рисунков — не более **5**.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов — формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть чёрно-белыми, чёткими и контрастными.

Статьи в редакции проходят научное рецензирование.