

УДК 621.762

ФОРМОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ИЗДЕЛИЙ В ТВЕРДОЖИДКОМ СОСТОЯНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ПОРОШКОВ СПЛАВА-ПРИПОЯ

*канд. техн. наук А.Т. ВОЛОЧКО, Ж.Е. МАКАРОВА
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск)*

Рассмотрены способы формования алюминиевых изделий в твердожидком состоянии с использованием дополнительных порошков сплава-припоя.

Введение. Использование методов формообразования в твердожидком состоянии является одним из перспективных процессов получения изделий в машиностроении. Причем их основная часть производится литьем под давлением (ЛПД). Это отличает способы высокой производительностью и низкой стоимостью заготовки, быстрым остыванием сплава в металлической оснастке, что приводит к получению мелкозернистой структуры. В последнее время для уменьшения пористости отливок процесс ЛПД осуществляют вакуумированием или вентиляцией пресс-форм с контролируемой скоростью впрыска сплава.

При создании в жидкотвердой массе избыточного числа центров кристаллизации в отливке формируется структура с недендридной формой зерна. Его измельчение при наложении сдвиговых деформаций и скорости охлаждения позволяет получать материалы с высокими эксплуатационными свойствами (управлять структурой зерна) [1,2].

Условия формирования недендридной структуры могут быть получены с использованием методов тиксо- и реолитья. В этих способах половину твердой фазы получают вне формообразующей оснастки, в условиях затвердевания препятствующих развитию дендридных форм кристаллов, что отличает их от традиционных способов литья [3 - 6].

При тиксолитье мерная заготовка получается охлаждением до комнатной температуры и затем повторно перед формообразованием нагревается до температуры ликвидус - солидус диаграммы состояния. При реолитье кристаллизация до жидкотвердого состояния осуществляется в одну стадию без промежуточного охлаждения и повторного нагрева с промежуточной тепловой стабилизацией заготовки. Охлаждение до температуры ликвидус - солидус может быть достигнуто и введением твердых частиц (порошков, гранул) того же состава, что и расплав.

Процессы осуществляют на специальном оборудовании (в том числе используются прессы обработки металлов давлением и литейные пресс-машины) при давлении прессования 40...80 МПа. Скорость металла в литниковом ходе не превышает 10 м/с, что ниже скорости литья под высоким давлением (10... 100 м/с). Для сравнения, скорость металла в литниковом ходе под средним давлением 3...6 МПа составляет 2...8 м/с, при жидкой штамповке - 1...4 м/с.

Внедрение процесса тиксоформования в твердожидком состоянии требует освоения таких технологий, как производство заготовок, процесс нагрева, а также реализация способов ЛПД с контролем адаптированности структуры частиц к сдвигу.

При освоении технологий возникают следующие трудности:

- при содержании в заготовке жидкой фазы 40...60 % ее транспортирование как твердого тела без нарушения геометрической формы затруднительно;
- узкий интервал температуры, связанный с допустимым изменением доли жидкой фазы, может приводить к ее фильтрации через каркас частиц кристаллов и образованию дефектов микроструктуры;
- для тиксоформования применим ограниченный класс алюминиевых сплавов.

Присутствие в материале твердых дисперсных частиц (твердых смазок, оксидов, карбидов) требует повторного частичного расплавления и выдержки, что может уменьшить эффект достижения эксплуатационных свойств материала.

Цель исследования - разработать способы формования алюминиевых изделий в твердожидком состоянии с использованием дополнительных порошков сплава-припоя, исследовать при этом структуру и свойства получаемых материалов.

Методы порошковой металлургии позволяют получать алюминиевые порошки как из расплава, так и механическим диспергированием стружечных отходов. Кроме того, методы отличаются универсальностью как в получении разных составов и морфологий частиц, так и возможностью управления их размером и соотношений [7]. Это дало возможность разработать способы формообразования изделий с использованием дополнительных порошков сплава-припоя [8, 9]. Сущность разработанных способов сводится к тому, что материал формы прессовки обладает свойствами устойчивого твердого тела до попадания в формообразующую полость с преобладающими свойствами вязкопластичной среды под действием нагрузки и сдвигающих напряжений.

Новизна предложенных способов сводится к тому, что процесс сложного формообразования изделий из алюминиевых порошков осуществляется при расплавлении дополнительных порошков сплава-припоя, введенных в состав заготовки на стадии приготовления шихты и выбранных в соответствии с выработанными принципами:

- воспроизводимость процесса в устойчивом режиме определяется температурой плавления дополнительного сплава-припоя и должна быть ниже температуры плавления основного сплава алюминия;
- обеспечение хорошей жидкотекучести, смачивающей способности, обеспечение высокой коррозионной стойкости и механических свойств;
- реологические свойства частиц (морфология, размер, соотношение) должны обеспечивать равномерность распределения жидкой фазы и определять вязкость материала прессовки;
- применение должно быть экономически целесообразно.

Наиболее полно соответствуют перечисленному комплексу требований сплавы системы алюминий - кремний (силумины). Среди широкой гаммы изменяющегося содержания кремния наибольшее распространение получил эвтектический силумин (содержание кремния 11,3 %) [10]. Для сравнения был использован и эвтектический сплав системы алюминий - медь (содержание меди 33 %). Выбор сплавов эвтектического типа был обусловлен тем, что они наряду с малыми значениями температуры плавления характеризуются также высокой жидкотекучестью. Еще большее понижение температуры может быть достигнуто комплексным легированием сплава-припоя. Это имеет смысл при использовании сплава-припоя для связывания частиц порошка большинства промышленно применяемых легированных алюминиевых сплавов, в первую очередь сплавов основы алюминий - медь, алюминий - кремний. С этой целью были использованы сплавы системы алюминий - медь - кремний - магний. Их состав и температура плавления приведены в таблице.

Введение небольшого количества магния (0,5...1,5 %) в состав алюминиевых сплавов понижает температуру плавления, и в результате испарения затрудняет образование окисных пленок в контакте между частицами [11, 12], не дает возможность алюминию реагировать с кислородом, находящимся внутри прессовки. Чрезмерное повышение магния в припое приводит к снижению уровня механических свойств композита, что может быть объяснено растрескиванием контакта на участках связывания частиц [12], их охрупчиванием (см. таблицу).

Результаты исследований выбора сплава-припоя

Состав сплава	Температура, К		Механические свойства			
	плавления сплава-припоя	экструдиро- вание	после экструдирования		после отжига	
			σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %
Al - 11,7 % Si	850	853	72	12,1	86	14,5
Al - 33 % Cu	821	853	75	9,8	110	15,0
Al - 26,7 % Cu - 5,2 % Si - 0,5 % Mg	813	818	118	10,4	126	9,2
Al - 13,6 % Cu - 9,6 % Si - 0,5 % Mg	818	818	96	10,9	105	16,0
Al - 13,6 % Cu - 9,6 % Si - 0,5 % Mg	818	818	93	8,9	91	9,0
Al - 13,6 % Cu - 9,6 % Si - 0,5 % Mg	818	723	71	6,3	90	7,4
Zn - 10 % Al - 0,5 % Mg	693	818	124	6,6	104	12,0

Целесообразно было также оценить свойства заготовок, полученных добавлением в шихту порошков цинко-алюминиевого сплава-припоя, поскольку эти сплавы характеризуются высокой пластичностью и имеют низкую температуру плавления [10, 11, 13]. Так, сплав, содержащий 10 % алюминия, имеет температуру плавления 693 К.

Заготовки из смеси порошков алюминия (фракция -0630 +0001) и порошков каждого из упомянутых сплавов-припоев (фракция -0002 +0001) в количестве 5 % получали прессование в жестких пресс-формах экструдированием при деформации 70 % в установленном температурном интервале (см. таблицу). Изучение механических свойств (предел прочности, относительное удлинение) проводили на образцах, изготовленных непосредственно после экструзии, а также подвергнутых в последующем гомогенизирующему отжигу при температуре 773 К в течение восьми часов. Для композита с цинковым припоем отжиг осуществлялся при температуре 673 К.

Повышение вязкости, по мнению некоторых авторов [14, 15], при соблюдении соответствующих условий дает возможность материалу в широких пределах изменять свою форму, не подвергаясь при этом разрушению. Такое состояние вязкой среды может быть условно принято уже при температурах, близких к точке плавления металлических сплавов [14]. Однако повышение вязкости алюминиевых частиц, хотя и позволяет залечивать дефекты в процессе деформации, но делает это в ущерб физико-механическим свойствам материала. Было установлено, что при добавлении в шихту порошков дополни-

тельного сплава-припоя в количестве, превышающем 2...3 %, с температурой плавления ниже температуры плавления основного сплава возможно бездефектное деформирование, состояние материала характеризуется как квазижидкое. Заготовка после нагрева перед формованием легко транспортируется. Эффективность способа обеспечивается выбором сплава-припоя, который способен образовывать металлическую связь между составляющими основного компонента - припаять друг к другу частицы из алюминиевого сплава.

Частичное растворение основного металла, повышающее вязкость приграничных слоев, является, пожалуй, основным, что определяет свойства композиции неограниченно пластически деформироваться при очень малых усилиях без нарушения сплошности. Во время деформации жидкая фаза сплава-припоя, заключенная между частицами основного сплава, заполняет поры, промежутки между частицами и по трещинам в окисных пленках проникает до чистого металла.

Прессование при температуре появления жидкой фазы сплава-припоя значительно уменьшает давление, необходимое для достижения определенной пористости заготовки (рис. 1). Анализ результатов исследования прессуемости (связь давление - пористость) показывает, что при давлении 250 МПа пористость брикетов, полученных при трех различных температурах 293, 773, 823 К, имеет значения 15,2, 4,5, 2,3 % соответственно, а при давлении 400 МПа - 9,1, 3,2, 1,7 %. Следует отметить, что присутствие между частицами основного сплава небольших количеств жидкой составляющей сплава-припоя еще более снижает давление и для обеспечения требуемой плотности заготовки 94...97 % от теоретической достаточно давления около 70... 100 МПа.

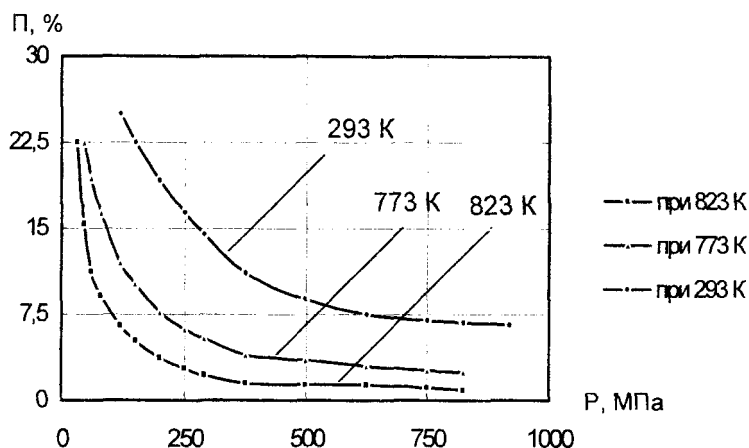


Рис. 1. Прессуемость композиции из порошков сплава АлК, сплава припоя и 1,5 % графита при различных температурах

Чрезмерное содержание сплава-припоя (более 10... 12 %), а также деформирование при температуре плавления эвтектических составляющих основного сплава приводит к потере геометрической формы, снижению механических свойств. При использовании порошков сплава, в состав которых входят легкоплавкие металлы, не образующие с алюминием химических соединений (олово, свинец, висмут), наблюдается расслаивание.

В связи с этим задача отыскания высокого уровня механических свойств материала не в ущерб его антифрикционности при установлении оптимума технологических параметров должна решаться с учетом состава структурных составляющих композита и их соотношения.

Результаты исследований позволяют отметить, что высокий уровень механических свойств наиболее полно обеспечивается добавлением в шихту порошков состава Al - 13,6 % Si - 0,5 % Mg (АлМК), представляющего собой эвтектический сплав. В этом случае наличие легирующих элементов кремния, меди и магния имеет сравнительно невысокое процентное содержание, что обеспечивает пластичность материала при его относительно высокой прочности. Этот сплав имеет и низкое значение температуры плавления (705 К), что вполне приемлемо при добавлении в шихту, основным компонентом которой являются порошки сплава Al — 5 % Si — 0,5 % Mg — 1 % Ni (АлК).

Далее рассмотрим, как изменяются свойства композиционного материала из порошков указанного сплава алюминия с 1,5 % графита в зависимости от температуры деформирования в случае проведения экструдирования шихты с добавками порошков сплава-припоя и без них. Температура экструдирования варьировалась в пределах 673...873 К, содержание дополнительного сплава изменялось до 15 %.

В ходе экспериментальных исследований выявлено, что изменение относительного удлинения образцов без дополнительного сплава-припоя происходит по кривой с максимальными значениями в интервале температур 773...793 К (рис. 2).

Несколько иной характер изменения относительного удлинения был отмечен для заготовок, полученных добавлением в шихту 5 % сплава-припоя следующего состава АлМК: для заготовок, экструдированных при температуре начала появления жидкой составляющей сплава-припоя, отмечено повышение относительного удлинения, а также незначительное увеличение предела прочности.

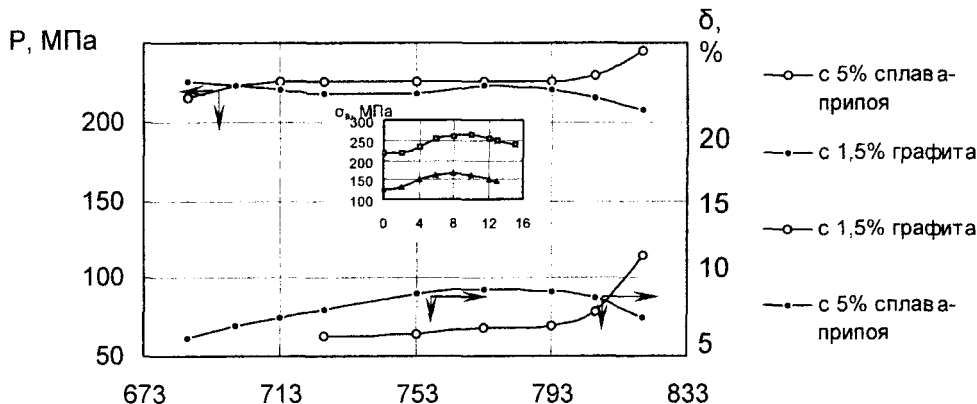


Рис. 2. Изменение механических свойств порошкового композита АлК от температуры экструдирования и количества вводимого сплава-припоя АлМК

Судя по изменению кривых, отражающих зависимость свойств заготовок от количества в шихте сплава-припоя, следует отметить, что заметное повышение уровня механических свойств наблюдается уже при содержании добавок в пределах 3...7 % (см. рис. 2). Повышение количества жидкой фазы нежелательно ввиду затруднений, связанных с получением качественных полуфабрикатов [7, 8].

Исследование влияния степени деформации на свойства композита из порошков сплава АлК с 1,5 % графита (оценка проводилась при установлении оптимума остальных параметров процесса) показало, что для получения заготовок с высокими механическими свойствами требуется степень деформации порядка 70...75 % (рис. 3). При ее дальнейшем увеличении уровень свойств отмечен постоянством. Заготовки, экструдированные при деформации менее 70 %, характеризуются неполным схватыванием алюминиевых частиц, усугубляемым присутствием окисных пленок и неметаллических включений (графит). Предел прочности на разрыв образцов, полученных при деформации менее 20 %, стремится к нулю (см. рис. 3).

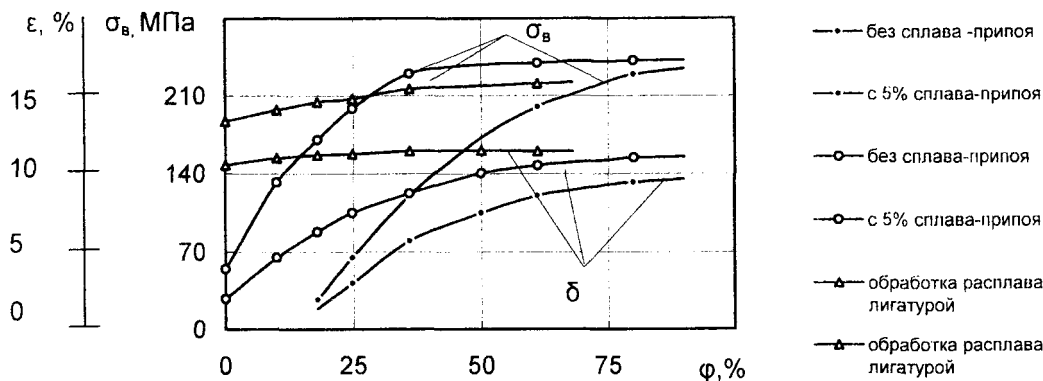


Рис. 3. Влияние степени деформации на механические свойства композита АлК-1,5%графита, полученного различными способами

При добавлении в шихту 5 % сплава-припоя свойства полученного композита возросли примерно на 5... 15 % (см. рис. 3). Более ощутимым результатом является то, что необходимая степень деформации для достижения достаточно высоких механических свойств составляет около 30 %, что на 40...45 % меньше, чем у заготовок, для связывания частиц которых не применяли дополнительный сплав-припой. Кроме того, определенный уровень свойств был достигнут и в результате двухстороннего прессования в

жестких пресс-формах. При этом величина предела прочности составила 60 МПа и относительного удлинения - 1,5 %.

Очевидно, во время совместного деформирования шихты жидкая фаза сплава-припоя растекается и проникает до чистого металла, образуя дополнительные мостики схватывания между частицами порошка основного сплава алюминия. Интенсивность процесса связывания частиц посредством контакта жидкого металла с основным алюминиевым сплавом основана на их взаимодействии, характер и степень которого определяют качество заготовок.

Изучение микроструктуры переходной зоны между алюминием и сплавом-припоем в образцах, экструдированных при твердом состоянии компонентов, позволяет отметить, что в местах наличия сплава-припоя выявляется дендритный каркас, окруженный переходным слоем с мелкими включениями. Для образцов, экструдированных при температуре появления жидкой составляющей сплава-припоя, характерно образование в переходном, не имеющем четких границ слое, обособленных слабо выраженных дендритов одной из фаз сплава-припоя. Диффузионный отжиг, проведенный после экструзии образцов при температуре 773 К в течение 8 часов, приводит к увеличению переходного слоя и обособленных кристаллов, которые потеряли дендритную форму (рис. 4).

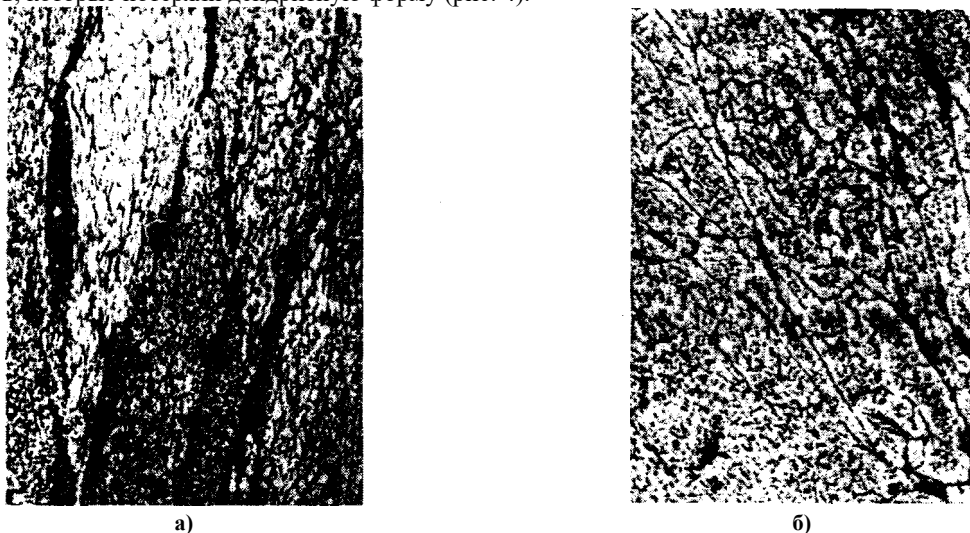


Рис. 4. Микроструктура порошкового алюминиевого сплава с 5 % сплава -припоя: после экструдирования (а); диффузионного отжига (б)

Частичное растворение основного металла в припой (при скоротечности процесса), как отмечают авторы [12, 16], является для названных сплавов основным механизмом взаимодействия жидкого металла с поверхностным слоем соединяемых частиц. При этом химический состав кристаллизационных зон практически зависит от диаграммы состояния, если учесть, что температура деформирования лимитирована недопустимостью оплавления сплава-основы [7]. На процесс взаимодействия жидкой и твердой фазы может существенно накладываться отпечаток диффузия компонентов припоя в основной металл, химические реакции между припоем и твердым металлом [16, 12], а также массоперенос, обусловленный приложением давления [17, 18]. В связи с этим подтверждение эффективности добавок сплава-припоя должно быть экспериментально проверено. Предел прочности заготовок, полученных кристаллизацией расплава, обработанного лигатурой, меньше на 15...20 %, чем у порошкового композита, экструдированного при деформации 70 %. Однако величина относительного удлинения литейного композита несколько больше и составляет 10,8 % при значении предела прочности 180 МПа. Обработка давлением таких заготовок повышает их механические свойства. Так, экструзия при деформации 30 % обеспечивает материалу значение предела прочности 210 МПа и относительного удлинения - 11,6 %.

Исследование влияния нагрузки на коэффициент трения по стали композитов, полученных различными способами, позволяет отметить, что величина коэффициентов имеет невысокие значения (0,01...0,02) (рис. 5). Образцы порошкового композита полученного экструдированием при деформации 30 % без сплава-припоя, характеризуются наименьшим значением коэффициента трения (0,01), а также быстрой приработкой. Это, по-видимому, связано с впитыванием смазки порами, а также быстрым расслаиванием графита в зоне трения с образованием тончайших разделяющих пленок. Однако применение таких материалов ограничено их малой конструкционной прочностью. В связи с чем предпочтение отдается композитам, экструдированным при деформации более 70 %, которые сочетают высокие антифрикционные и механические свойства. Добавки в состав шихты порошков сплава-припоя, обеспечивающего высокую прочность композита при невысоком коэффициенте трения, являются целесообразными в усло-

виях, когда получение изделий сложной формы связано с недостаточной проработкой структуры или же с трудностями при получении бездефектной поверхности.

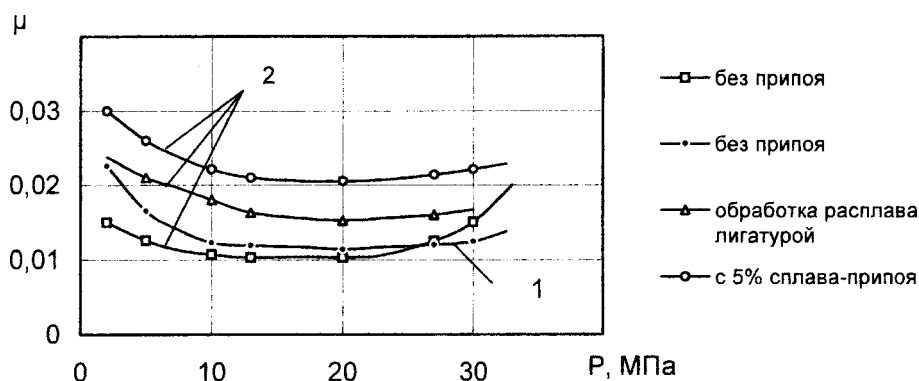


Рис. 5. Влияние нагрузки на коэффициент трения композита АлК-1,5 графита, полученного различными способами: 1 - степень деформации 70 %; 2 - степень деформации 35 %

Выводы. Способы могут быть успешно реализованы и при получении изделий сложной формы методом ЛПД, штамповки, экструзии, когда наличие сдвиговых деформаций не во всех сечениях заготовки обеспечивает ей необходимую прочность, а также при недостаточной пластичности материала, приводящей к растрескиванию пресс-изделий. В этом случае добавки сплава-припоя при прессовании в установленном температурном интервале обеспечивают как устранение дефектов изделия, так и прочное связывание частиц порошка основного сплава [8, 9].

ЛИТЕРАТУРА

- Открытие № 271. Новая закономерность кристаллизации металлических материалов / В.И. Добаткин, А. Ф. Белов, Г.И. Эскин и др. // Вестник АН СССР. - 1984. - № 1. - С. 139.
- Добаткин В.И., Эскин Г.И. Слитки с недендридной структурой для деформации в твердожидком состоянии // Цветные металлы. - 1996. - № 2. - С. 68 - 70.
- Семенов Б.И., Мельников Н.А. Принципы и техпроцесс получения точных заготовок из сплавов, находящихся в твердожидком состоянии // Металлургия машиностроения. - 2001. - № 1. - С. 36 - 43.
- Толочко Н.К., Шиенок Ю.А., Мьяльдун А.З., Мозжаров С.Е. // Литье и металлургия. - 2003. - № 2. - С. 39-46.
- Lin Y.Q., Fan Z. Application of thermodynamic calculation to the aluminium alloy design for semi-solid metal processing // Materials Science Forum. - 2002. - V. 396 - 402. - P. 717 - 722.
- Jurko J.A., Nui X.P., Pinwill I. // J. Mater. Sci. Letters. - 1999. - V. 18. - P. 1869 - 1870.
- Ласковнев А.П. Композиционные материалы на основе порошковых сплавов алюминия. - Гомель: ИММС НАН Б, 2002. - 144 с.
- А.с. № 1459084. Способ изготовления изделий из алюминий-медь-магниевого сплава / Г.Л. Царев, В. М. Бабиченко, А.Т. Волочко, А.П. Чельшев, А.И. Стрикелев, В.А. Ситник / ФТИ АН БССР; Заявл. 09.07.86.
- А.с. № 1376353. Способ получения полуфабрикатов графитизированных алюминий-медных сплавов / А.Т. Волочко, Г.Л. Царев, В.М. Бабиченко, А.П. Чельшев, И.П. Прокопов, Г.И. Бортник / ФТИ АН БССР; Заявл. 30.03.87.
- Бережной В.Л. Трение, неравномерность деформации и дефектообразования при прессовании: Уч. пособие. - Ростов н/Д: РИСХМ, 1977. - 79 с.
- Структура и свойства алюминиевых сплавов: Пер. с англ. / Л.Ф. Мондольфо. - М.: Металлургия, 1979. - 640 с.
- Никитский А.М. Пайка алюминия и его сплавов. - М.: Машиностроение, 1983. - 190 с.
- Вол А.Е. Строение и свойства двойных металлических систем: В 4-х т. -М.: Физматгиз, 1959. -Т. 1 -755 с.
- Губкин С.И. Пластическая деформация металлов: В 3-х т. - М.: Металлургиздат, 1961. -Т. 3. - 306 с.
- Микляев П.Г., Фридман Я.Б. Анизотропия механических свойств металлов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Металлургия, 1986. - 223 с.
- Скорород В.В., Солонин С.М. Физико-металлургические основы спекания порошков. - М.: Металлургия, 1984. - 158 с.
- Северденко В.П., Шепельский Н.В., Жилкин В.З. Обработка давлением гранул алюминиевых сплавов. - М.: Металлургия, 1980.-216 с.
- Семенов А.П. Схватывание металлов. - 2-е изд., перераб.и доп. - М.: Машгиз, 1958. - 280 с.