

одновременном увеличении прочности и долговечности шестерен, сокращении цикла упрочнения с 28 часов до 5 минут, сокращении затрат электроэнергии в 11,6 раз, полном устранении выбросов вредных испарений и газов в окружающую среду и затрат природного газа, закалочного масла, жаропрочных и жароупорных материалов.

Стоимость материала для изготовления шестерен снижена в 2,7 раза. Исключены потребление природного газа, закалочного масла, жаропрочных и жароупорных материалов и выбросы вредных испарений, дыма, сажи, тепла и газов в окружающую среду.

Годовой экономический эффект от внедрения ОПЗ для деталей колесной передачи автомобилей «МАЗ» 5440-2405028 — шестерня и 5336/5551-

2405035 — сателлит на программу составляет 1291,12 млн. рублей.

Стоимость оборудования для объемно-поверхностной закалки в сравнении с оборудованием для химико-термической обработки в десятки раз ниже. Так, например, стоимость комплекса «Ипсен» для химико-термической обработки этих деталей с производительностью 20 шт./час составляет около 2 млн. евро (5,2 млрд. белорусских рублей), а стоимость установки ОПЗ для упрочнения сателлитов колесной передачи с производительностью 74 шт./час составила около 190 млн. бел. рублей.

Технологический процесс и конструкция установок защищены патентами РБ на изобретение и полезную модель.

Литература

1. Ракомсин А.П., Гаухштейн И.С., Гурченко П.С., Михлюк А.И. Способ управляемого закалочного охлаждения стальных изделий. Патент РБ № 7184 на изобретение от 01.02.2005, МТ1К7С21Д 11/00, 1/78.
2. Гурченко П.С., Михлюк А.И., Дариушкин КС, Гуринович И.И., Позняк С.А., Климович А.А., Гуринович В.А., Ракомсин А.П. Устройство для управляемой закалки деталей и сталей пониженной прокаливаемости. Патент РБ на полезную модель №2374 от 15.09.2005.

ПРОЦЕССЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ В ТВЕРДОЖИДКОМ СОСТОЯНИИ

Волочко А.Т., ФТИ НАН Беларуси

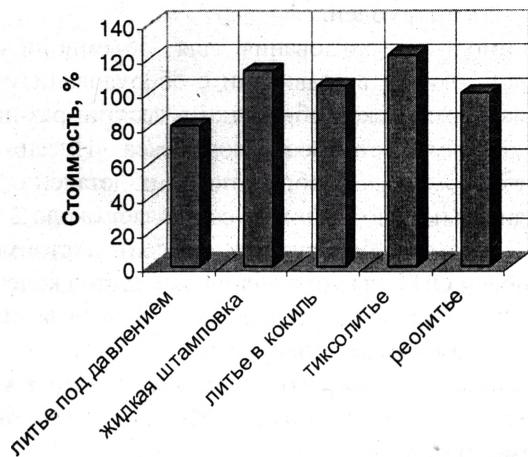
Применение методов формообразования в твердожидком состоянии является одним из перспективных процессов получения изделий в машиностроении. С использованием этих методов получают детали из материалов на основе Al, Mg, Zn, Sn и ряда других сплавов. Особый интерес в последние годы вызывают материалы на основе алюминия, они определяют возможность создания легких деталей взамен изделий из стали и чугуна [1,2]. В качестве примера можно привести такие детали, как диски автомобиля, картер маховика, шатун, главный тормозной цилиндр и др. Однако, несмотря на широкое использование, традиционные методы литья, не всегда обеспечивают требуемый уровень качества и свойств материала заготовок.

Сравнительная оценка стоимости отливок (рис. 1 а) [3], полученных различными методами литья, указывает, что литье под давлением (ЛПД) характеризуется наименьшей стоимостью и высокой производительностью процесса. Однако использование этого метода для формования ответственных изделий ма-

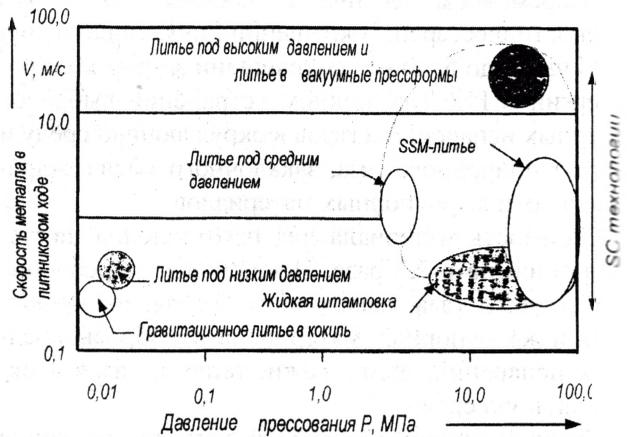
шиностроения связано с рядом существенных недостатков, в первую очередь, с неоднородностью свойств и остаточной пористостью, что не позволяет производить повторный нагрев под закалку. В последнее время для уменьшения пористости отливок процесс ЛПД осуществляют вакуумированием или вентиляцией пресс-форм с контролируемой скоростью впрыска сплава, что значительно усложняет процесс и увеличивает стоимость литья.

Жидкая штамповка в отличие от ЛПД хотя и позволяет получать более плотные заготовки с небольшими припусками под механическую обработку, однако часто приводит к ликвации жидкого металла.

В последние годы особое развитие получили тиксотехнологии (так называемые «Semi-Solid Metal» — SSM) — процессы формообразования в твердожидком состоянии, основанные на эффекте тиксотропии — способности снижать сопротивление сдвиговым деформациям при затвердевании при определенном давлении и скорости в литниковом ходе (рис. 1 б) [4]. Необходимым условием эффекта тик-



а



б

Рис. 1. Оценка стоимости литья (а) и характеристики параметров процессов (б) при получении алюминиевых изделий различными методами

сопротивления является формирование недендритной (глобулярной) микроструктуры закристаллизовавшейся фазы сплава. Возможность управления недендритной формой зерна теоретически и экспериментально подтверждена открытием, сделанным в ВИЛСе (г. Москва) А.Ф. Беловым, В.И. Добаткиным, Г.И. Эскиным и др. [5]. При этом фактором, однозначно определяющим размер субдендритного зерна и обеспечивающим его измельчение, становится скорость охлаждения расплавленной массы. При глобулярной форме зерна в присутствии жидкой фазы сдвиг между частицами резко снижается, кроме того, материал в этом случае находится в состоянии нулевой жидкотекучести. Наследование или управление глобулярной формой зерна отличают эти способы формирования от обычных методов литья и позволяют:

- повысить механические свойства;
- уменьшить пористость;
- обеспечить точность размеров;
- сократить количество переходов и расход материала на изделие;
- определить возможность получения композиционных материалов.

При этом формообразование начинают в условиях получения тиксозаготовок вне прессовой оснастки, и только эвтектическая составляющая сплава кристаллизуется в формообразующей полости.

Интерес к таким заготовкам проявляется как со стороны литейщиков, так и со стороны специалистов обработки металлов давлением (ОМД), что объясняется и снижением сопротивления деформированию. Так, при увеличении доли жидкой фазы с 0 до 20% сопротивление деформированию умень-

шается в 5 раз, а при увеличении до 80%, заготовку можно получать гравитационным литьем.

Коммерческий статус освоения и развития тиксоформования получен зарубежными фирмами США Европы, Японии, среди которых следует выделить Althix (Франция), Formcast (США), IBF, Aaxel (Германия), LKR (Австрия), Rheo-Technology LTD Hitachi Metals LTD (Япония) [2,4,6].

В России работы по получению тиксозаготовок и формированию необходимой структуры материала проводились в таких научных центрах как ВАМИ (г. Санкт-Петербург), МГТУ им. Баумана (г. Москва) [7–9]. Однако организация производства находится в стадии разработки. В настоящее время существуют два конкурирующих направления тиксоформования – тиксо- и реотехнологии (рис. 2).

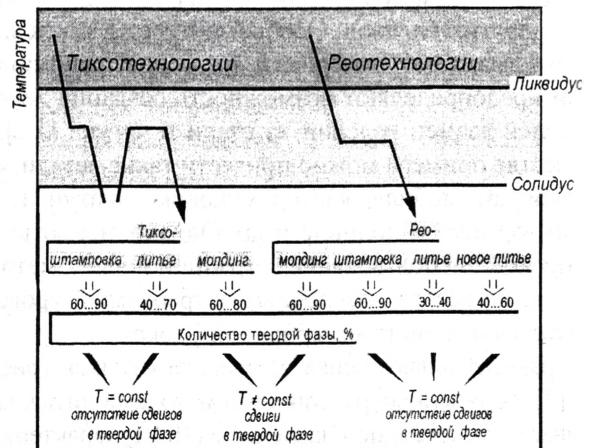


Рис. 2. Тепловые условия и общая характеристика тиксоформования в твердожидком состоянии различными методами SC-технологий

В зависимости от количества твердой фазы, тепловых и силовых условий на рис. 2 приведена классификация существующих технологий тиксоформования. Для этих технологий характерно получение мерной заготовки путем охлаждения до комнатной температуры и затем повторное нагревание перед формообразованием до температуры ликвидус–солидус диаграммы состояния. Внедрение тиксотехнологий требует освоения следующих процессов: производство заготовок, нагрев, а также реализация способов формования с контролем адаптированности структуры частиц

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.

Относительно новыми процессами, заимствованными из области обработки полимеров является тиксомолдинг и реомолдинг (рис. 3). Фактически эти процессы объединяют в одном цикле операцию приготовления суспензии и формообразования. Это позволяет повысить производи-

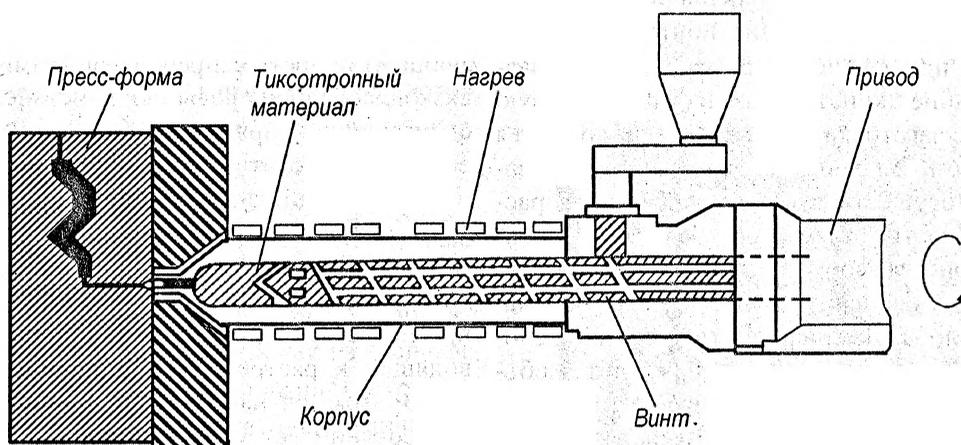


Рис. 3. Схема процесса тиксомолдинга

к сдвигу. При этом выбор режима формования и контроль процесса производится с помощью calorиметрических зависимостей теплоемкости заготовки от температуры в районе ликвидус–солидус диаграммы состояния. Однако из-за достаточно высокой стоимости заготовок и потребности в специально разработанном дорогостоящем оборудовании по получению тиксозаготовок развитие этого направления в последнее время, особенно в Европе, приостановилось.

В более выгодном положении оказались реотехнологии — «суспензия по требованию». При этих технологиях кристаллизация до твердожидкого состояния осуществляется в одну стадию без промежуточного охлаждения и повторного нагрева с промежуточной тепловой стабилизацией заготовки. Охлаждение до температуры ликвидус–солидус может быть достигнуто как контролируемым теплообменом, так и введением твердых частиц (порошков, гранул) того же состава, что и расплав.

Процессы осуществляют на специальном оборудовании (в том числе используются прессы для обработки металлов давлением и литейные прессы) при давлении прессования 40–80 МПа.

тельность, автоматизировать процесс и снизить энергозатраты. Обеспечение безопасной рабочей среды, что существенно при обработке магниевых сплавов, позволило освоить процесс тиксомолдинга ряду коммерческих фирм, в эксплуатации которых находится более 100 устройств [7].

В отличие от тиксомолдинга, где сырьем являются гранулы, а процесс ограничен малым содержанием твердой фракции, в процессе реомолдинга сырьем является жидкий металл. Расплав (главным образом из сплавов на основе Zn–Al–Cu и Sn–Pb) механически перемешивается вращающимся винтом (шнеком) и, охлаждаясь, преобразуется в твердожидкую массу и затем под давлением поступает в литейную форму.

Для получения изделий из литейных и деформируемых алюминиевых сплавов методом одной из SSM-технологий ведутся разработки, получившие коммерческое название «нового процесса реолитья» (new rheocasting process) (рис. 4) [6]. Этот метод, в отличие от тиксоштамповки, характеризуется меньшей стоимостью отливки и позволяет обрабатывать более широкий диапазон сплавов.

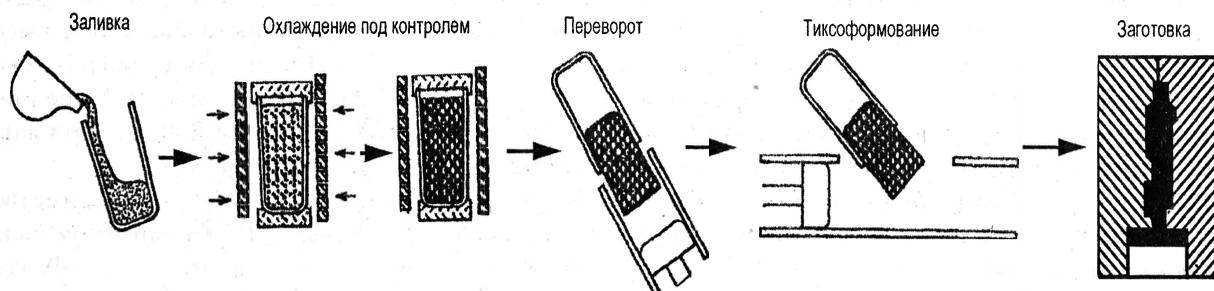


Рис. 4 – Схема процесса «нового» реольтья

Определенную массу металла заливают в специальный желоб – стакан, закрепленный на карусельном механизме. Условия контролируемого теплообмена при вращении стакана обеспечивают образование кристаллов, их глобулярную форму. Далее заготовка подается в машину литья под давлением. Управление зародышеобразованием может осуществляться и введением в расплав гранул (частиц того же состава) [10]. Основная идея процесса формования частично охлажденного сплава основана на использовании охлаждаемого желоба. Ламинарное заполнение желоба и тепловая изоляция стакана приводит к объемному охлаждению массы металла, который после охлаждения на 5–20 К выше температуры ликвидус и может подвергаться вибрации ультразвуковых колебаний, что способствует формированию мелкозернистой структуры.

Вместе с тем при освоении процессов тиксоформования изделий, в особенности из композиционных материалов, 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, нитридов и др.) требует повторного частичного расплавления и выдержки, что может уменьшить эффект достижения эксплуатационных свойств материала.

В ФТИ НАН Беларуси разработаны способы формования алюминиевых изделий в твердожидком состоянии с использованием дополнительных порошков сплава-припоя. Сущность разрабо-

танных 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.

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 (рис. 5). 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 [11].

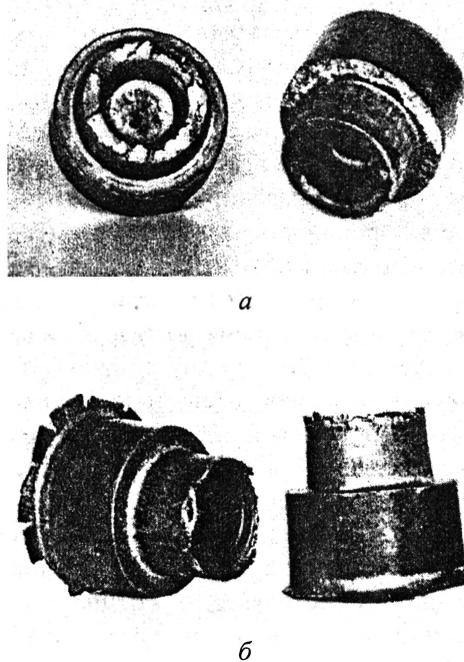


Рис. 5. Изделия, полученные штамповкой в твердом (а) и в твердожидком состояниях (б)

Новизна предложенных способов сводится к тому, что процесс сложного формообразования изделий из порошковых алюминиевых заготовок 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.

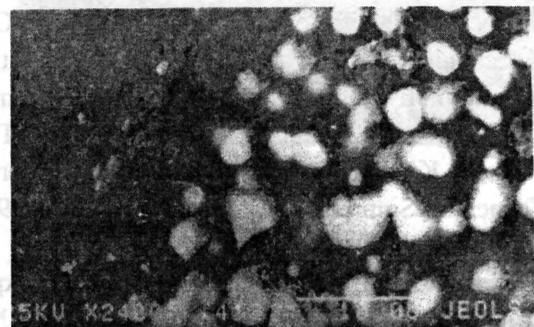
Методы порошковой металлургии позволяют получать алюминиевые порошки как из расплава, так и механическим диспергированием стружечных отходов. Кроме того, методы отличаются универсальностью как в получении разных составов и морфологии частиц, так и возможностью управления их размером и соотношений [12].

При этом выбор технологических режимов формования и дополнительных порошков должен осуществляться таким образом, чтобы исключить образование дендритной структуры на границе раздела твердая частица – расплав (рис. 6).

Наиболее полно соответствуют перечисленному комплексу требований сплавы системы алюминий – кремний (силумины). Среди широкой гаммы изменяющегося содержания кремния наибольшее распространение получил эвтектический силумин (содержание кремния 12,8 %) [13]. 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 легиру-

ванных алюминиевых сплавов, в первую очередь сплавов основы алюминий – медь, алюминий – кремний. С этой целью были использованы сплавы системы алюминий – медь – кремний – магний.

Введение небольшого количества магния (0,5...1,5%) в состав алюминиевых сплавов снижает температуру плавления и в результате испарения затрудняет образование оксидных пленок в контакте между частицами, 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, их охрупчиванием.



а



б

Рис. 6. Микроструктуры переходной зоны твердая – жидкая фаза после различных тепловых условий формования изделий — глобулярная структура (а), дендритная структура (б)

Положительные результаты получены и при добавлении в шихту порошков цинко-алюминиевого сплава-припоя, поскольку эти сплавы характеризуются высокой пластичностью и имеют низкую температуру плавления [13]. Так, сплав, содержащий 10 % алюминия, имеет температуру плавления 693 К.

Интенсивность процесса связывания частиц по-

средством контакта жидкого металла с основным алюминиевым сплавом основана на их взаимодействии, характер и степень которого определяют качество заготовок.

Частичное растворение основного металла в припое (при скоротечности процесса) является 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 де-

формирования лимитирована недопустимостью оплавления сплава-основы [14]. На процесс взаимодействия жидкой и твердой фазы может существенно накладываться отпечаток диффузия компонентов припоя в основной металл, химические реакции между расплавом и твердым металлом, а также массоперенос, обусловленный приложением давления. Это требует в каждом конкретном случае дополнительных исследований выбора сплава и оптимизации технологических режимов.

Литература

1. Волочко, А.Т. Переработка и использование алюминиевых отходов в производстве порошков, паст, композиционных и керамических материалов – Минск: Бел. наука, 2006. – 302 с.
2. Giordano P., Chiarmetta G.L. Thixo and Rheocasting: comparison on a high production volume component // Proc. of 7-th Int. Conf. On Semi-Solid Proc. Of Alloys and Comp.– Tsukuba (Japan), 2002.– P. 665-670.
3. Mechanical and microstructural characterization of semisolid rheocast A356 and A357 aluminum alloys for automotive applications / M. Rosso, T. Romano, P. Giordano, G.L. Chiarmetta //Proc. of 7-th Int. Conf. On Semi-Solid Proc, Of Alloys and Comp. – Tsukuba (Japan), 2002. – P. 151-156.
4. Kainer, K. Squeeze Casting - A Process for the Production of High- Performance Low-Cost Parts / K. Kainer, B. Sommer, E. Bohm / Proc. of the 29-th Int. Symp. Of Automotive Tech. & Autom. —München, 1997. - P. 65-70.
5. Открытие № 271. Новая закономерность кристаллизации металлических материалов / В. И. Добаткин [и др.]. // Вестник АН СССР. – 1984. – №1. – С. 139.
6. Pat. EP 841 406 A1. Method of shaping semisolid metals /M. Adachi, S. Sato, Y. Harada, H. Sasakil. 1998.
7. Семенов Б.И., Бочаров Ю.А., Куштаров К.М., Гладков Ю.А. Современные технологии формообразования в твердожидком состоянии / Кузнечно-штамповочное производство. – 2006. – №10. – С.33-43.
8. Borisov V.G., Kazakov A.A. Aluminium Composite Materials with Thixotropic Structure //Proc. 5th Int. Conf. Semi-Solid Processing of Alloys and Composites. –Colorado, 1998. – P. 539-548.
9. Косников Г.А., Чижиков В.В., Колесов С.С. Получение заготовок из сплавов в твердожидком состоянии // Литейное производство. – 2003. – №11.– С. 41.
10. Шиенок Ю.А. Особенности кристаллизации и плавления при литье металлов в твердожидком состоянии реокомпактирования / Вести НАН Беларуси. – 2006. – №4. –С.34-37.
11. Способ изготовления изделий из алюминий-медь-магниевого сплава: а.с.1376353 СССР; МКИ4 В 22 F1/00, 3/16, 3/14 / Опубл. 22.10.87.
12. Ласковнев, А.П. Композиционные материалы на основе порошковых сплавов алюминия – Гомель: ИМПС НАН Беларуси, 2002. – 143 с.
13. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л.Ф. Мондольфо; под ред. Ф.И. Квасова; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1979. – 639 с.
14. Волочко, А.Т. Формирование алюминиевых изделий в твердожидком состоянии с использованием дополнительных порошков сплава-припоя / А.Т. Волочко, Ж.Е. Макарова // Вестник ПГУ. Прикладные науки. – 2005. – № 6. – С. 157-162.