

Таким чином показано, що при нагріванні сталевих зразків з використанням електрофізичного впливу в атмосфері продуктів згоряння природного газу угар знижується на 20%. Отримані коефіцієнти окалиноутворення дозволяють визначити товщину окалини в залежності від величини впливу і температури нагріву в середовищі продуктів згоряння органічного палива. Використовуючи літературні дані щодо швидкості окалиноутворення різних марок сталей, можна визначити зменшення товщини окалини за рахунок електрофізичного впливу, що передбачається. Впровадження запропонованого способу економічного нагріву металу у промисловість є перспективою подальшої роботи у цьому напрямку.

### Список літератури

1. **Теплотехника** металлургического производства / По ред. Кривандина В.А. — М.: МИСИС, 2002. — Т. 1. — 607 с.
2. **Окисление** металлов / Под ред. Ж.Бенара. — М.: Металлургия, 1968. — Т. 1. — 500 с.
3. **Новикова Е.В., Курбатов Ю.Л.** Окалинообразование при электрофизическом воздействии на нагреваемый металл // Экотехнологии и ресурсосбережение, 1999. — № 6. — С. 73–74.
4. **Пат. 51118А** Украина, МКИ С21D1/34. Спосіб нагрівання сталевих заготовок у нагрівальній печі / Ю.Л. Курбатов, О.В. Новікова (Україна). — № 2002010151; заявл. 03.01.2002; опубл. 15.11.2002. Бюл. 11.
5. **Бокштейн Б.С.** Диффузия в металлах. — М.: Металлургия, 1978. — 247 с.

© Новікова О.В., Курбатов Ю.Л., 2003

ШЕВЕЛЕВ А.И. (ДП «ТЕХНОСКРАП» ООО «СКРАП», ДОНЕЦК)

## ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ В ПРОЦЕССАХ ПЕРЕРАБОТКИ ВТОРИЧНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

*Работа носит обзорный характер посвящена анализу перспектив использования методов обработки давлением в процессах переработки вторичных алюминиевых сплавов. Показано, что введение методов ОМД в процесс переработки вторичных алюминиевых сплавов позволит резко увеличить номенклатуру и качество получаемых из них изделий.*

### Введение

В настоящее время динамично развивается производство и потребление продукции из алюминиевых сплавов [1]. Алюминиевые сплавы являются одним из основных современных материалов, поскольку дают возможность эффективно решать проблемы мирового сообщества, связанные с созданием современных конструкций и машин в таких отраслях, как авиакосмический комплекс, транспорт, строительство, электротехника, аграрно-промышленное производство. Кроме этого, проблемы энергоснабжения и экологии во многом успешно решаются благодаря использованию алюминиевых сплавов.

В США, Европе, Японии наиболее динамично развивается рынок потребления алюминия в транспортном машиностроении (особенно автомобилестроении). При этом сохраняются и традиционные области эффективного применения алюминия, такие как производство тары и упаковки, строительство, электротехника.

В настоящее время доля алюминия в автомобилях, производимых развитыми странами составляет около 10%, однако уже в ближайшие несколько лет доля алюминия в перспективных моделях автомобилей увеличится до 40% и более. В первую оче-

редь это вызвано ужесточением законов в США, Японии, Европе по экологической и эксплуатационной безопасности. Одним из путей решения этой проблемы является сокращение удельного расхода топлива на единицу мощности, что прямо зависит от снижения массы автомобиля. По прогнозу, к 2005 году в мире будет использоваться более 8 млн. т. алюминиевых сплавов для автомобилей [1, 2].

Увеличение потребления алюминия в различных сферах человеческой деятельности приводит к увеличению количества алюминиевых лома и отходов [3]. Проблема их рационального использования является по-прежнему нерешенной. Одним из эффективных решений этой задачи является переработка вторичного алюминиевого сырья на заводах вторичной цветной металлургии и заводах по производству первичного алюминия.

При использовании вторичного сырья для производства алюминиевых сплавов наиболее прогрессивным путем считается помарочный сбор лома и отходов и выплавка из них соответствующих стандартных литейных алюминиевых сплавов по ГОСТ 1583-93 и деформируемых сплавов по ГОСТ 4784-97.

По сведениям из разных источников [1, 4, 5] расход электроэнергии при производстве алюминиевых сплавов из вторичного сырья в 15–30 раз меньше, чем при производстве из первичного.

Заводы по производству алюминиевого проката стремятся максимально увеличивать процентное содержание алюминиевых отходов в шихте, что позволяет снизить нормы расхода дорогостоящего первичного сырья и себестоимость изготавливаемой продукции.

Производство изделий из лома и отходов алюминиевых сплавов обходится значительно дешевле, чем из рудного сырья [5]. В связи с этим приобретает актуальность задача организации на заводах вторичной цветной металлургии (ВЦМ) производства полуфабрикатов из вторичных алюминиевых деформируемых сплавов. При этом возможны два пути: производство слитков и поставка их потребителям для дальнейшей обработки; и производство прутков, профилей непосредственно на заводах по производству вторичного алюминия и поставка их потребителям.

### **Производство алюминиевых сплавов из вторичного сырья**

Алюминиевые сплавы на основе вторичного сырья условно подразделяются на литейные, деформируемые и раскислители.

При производстве деталей отходы различных сплавов частично смешиваются между собой, загрязняются примесями других металлов и в таком виде поступают на заводы ВЦМ. Это приводит к выпуску ими в настоящее время всего лишь 5% деформируемых сплавов, остальное — литейные сплавы и раскислители, хотя заводы, работающие на первичном сырье выпускают 70% деформируемых сплавов.

Проблемы сбора и разделки лома [6–8], а также плавки и литья [9] являются основными сдерживающими факторами увеличения процентного содержания деформируемых сплавов в общем производстве вторичного алюминия. Кроме того, отечественные заводы по производству алюминия из вторичного сырья, как правило, не имеют специализированного оборудования для удаления из отходов железных включений, землистой засоренности и прочих примесей, а также собственного оборудования для обработки металлов давлением.

Заводы, работающие на первичном сырье, выпускают в несколько раз больше деформированных полуфабрикатов, чем отливок. Доля лома и отходов алюминиевых деформируемых сплавов, поступающих на заводы ВЦМ, в 4–6 раз превосходит выпуск этих сплавов заводами ВЦМ. В работах [10, 11] показано, что благодаря рационально-

му использованию вторичного алюминиевого сырья, объем выпуска деформируемых сплавов может быть значительно увеличен (с 5% до 30%).

Литейные и деформируемые сплавы вновь возвращаются в промышленность и после переработки используются в виде отливок и полуфабрикатов, а раскислители уходят из оборота. Поэтому несомненный интерес представляет задача эффективного использования раскислителей. В частности известно, что подача раскислителей в глубь расплава в виде прутка при помощи специальных устройств значительно увеличивает его усваиваемость. В связи с этим целесообразно организовать на заводах ВЦМ производство прутков из раскислителей. При таком подходе будет иметь место существенная экономия раскислителей и значительную часть лома и отходов деформируемых и литейных алюминиевых сплавов можно будет использовать для получения изделий методами обработки давлением.

Темпы роста выпуска алюминия выше темпов роста выпуска стали, поэтому спрос на раскислители будет снижаться. В связи с этим значительную часть лома и отходов деформируемых и литейных алюминиевых сплавов целесообразно будет использовать для увеличения выпуска деформируемых сплавов.

В отожженном состоянии по пластичности и коррозионной стойкости вторичные алюминиевые деформируемые сплавы ВД1, АКМ, АК6г, В95-2, АКМЦ равнозначны или превосходят сплав из первичного сырья Д1 и применяются при выпуске автобусов, трамваев, троллейбусов (в виде листов для их обшивки), воздухопроводов, различных приборов, в станкостроении, при изготовлении предметов бытовой техники, спортивного инвентаря и др. При этом стоимость полуфабрикатов ниже, чем из первичных сплавов Д1, АК6г и других сплавов, широко используемых в машиностроении; технологичность сплавов на основе вторичного сырья не только соответствует сплаву Д1, но во многих случаях превосходит его [10]. Сплав ВД1 используется также для производства сварных труб [12]. Непрерывнолитые профили из сплава АКМ нашли применение в агропромышленном производстве [13].

Хотя благодаря совершенствованию методов плавления и термообработки механические свойства вторичных алюминиевых сплавов во многих случаях не уступают свойствам сплавов из первичного сырья, большинство их применяется для производства изделий менее ответственного назначения.

Силумины из вторичного сырья так же нашли широкое применение: сплав АК7 применяется для изготовления корпусов шестеренчатых гидронасосов, из сплава АК5М2 производят профили, например, уголки. Из сплава АК5М7 получают детали пневмотормозной системы, поршней, цилиндров и др.

### **Перспективы деформирования вторичных алюминиевых сплавов**

В развитых странах (США, Англия, Германия) отсутствует разделение алюминиевых сплавов на первичные и вторичные. Фирмы-производители реализуют «алюминиевые сплавы в чушках» без указания их происхождения [14]. Это обусловлено налаженной системой сбора, сортировки и хранения алюминиевого лома и широким применением передовых технологий рафинирования расплава.

Хотя имеется большое количество работ доказывающих, что в ряде случаев продукция из вторичных сплавов по своим механическим свойствам не уступает аналогам, полученным из первичных материалов [11, 15-18], проблема качества вторичных алюминиевых сплавов на территории стран пост-советского пространства все еще остается актуальной.

В настоящее время на заводах ВЦМ сбор, доставка и хранение вторичного сырья по маркам не осуществляется. Все большую часть сырья составляет амортизационный лом, разделение которого на элементы по отдельным маркам затруднительно. Поэтому

в составе расплава, получаемого из лома и отходов алюминиевых сплавов, содержание примесей Si и Fe в 2 и 6 раз соответственно выше, чем в стандартных сплавах [19], что часто приводит к ухудшению технологической пластичности сплавов и невозможности их деформирования традиционными методами ОМД.

Кроме того, высокое содержание меди и других элементов в алюминиевых сплавах, выплавляемых из вторичного сырья, приводит к более низкой их коррозионной стойкости по сравнению с традиционными низколегированными сплавами.

Технологические возможности переработки недеформируемых (малопластичных) алюминиевых сплавов традиционными методами, такими как литье, порошковая металлургия, ограничены. В частности не могут быть получены изделия с тонкими стенками, длинные тонкие стержни и т.д. Кроме того является общеизвестным фактом что механические свойства изделий с литой структурой хуже, чем у изделий полученных деформированием.

Например, в работе [20] отмечается, что уровень механических свойств литых автомобильных дисков из алюминиевых сплавов часто оказывается недостаточным и для отечественных дорог более предпочтительны диски колес из алюминиевых сплавов, имеющие деформированную структуру. Они обладают высоким комплексом механических свойств, не разрушаются (в отличие от литых дисков) при случайных ударных нагрузках и позволяют без повреждений многократно менять шины. Кроме того, диски с литой структурой имеют меньшую удельную прочность, чем диски с деформированной структурой, поэтому масса литых дисков больше массы штампованных.

В работе [21] экспериментально доказана перспективность замены литья поршней для двигателей из сложнолегированных силуминов процессом горячей штамповки. Отмечено, что горячая деформация сопровождается образованием в сложнолегированных силуминах мелкозернистой структуры, дроблением частиц кремния и их более однородным распределением. Последнее благоприятно влияет на комплекс механических свойств сплавов для поршней.

Авторы работы [22] показали, что групповое производство точных поковок позволяет значительно увеличить номенклатуру деталей, переводимых на прогрессивные ресурсосберегающие технологии пластического деформирования взамен технологических процессов резания и кокильного литья. Технологические процессы холодного выдавливания различных поковок из цветных металлов и сплавов в среднем в 2 раза снижают расход металла, что делает рентабельным производства поковок малых серий.

Холодная обработка давлением в ряде случаев является более предпочтительной. В частности, холодная объемная штамповка (ХОШ) полуфабрикатов из малопластичных материалов позволяет сократить объем их механической обработки при одновременном повышении качества изделия [23] (снижение остаточной пористости, повышение прочностных характеристик вследствие деформационного упрочнения и т.д.).

Например, было показано [24], что переход от горячей объемной штамповки и механической обработки автомобильных дисков из алюминиевых сплавов на холодную объемную штамповку и выдавливание уменьшил себестоимость изделия и увеличил ресурсосбережение. Этот факт вызвал на ОАО «ГАЗ» тенденцию к максимально возможному расширению номенклатуры деталей, выпускаемых методом ХОШ.

Из изложенного выше следует целесообразность применения методов ОМД в производстве продукции из вторичных деформируемых и литейных алюминиевых сплавов, а также раскислителей. При этом ОМД двух последних групп сплавов невозможно без значительного повышения их технологической пластичности.

Ниже проанализированы различные процессы ОМД вторичных алюминиевых сплавов и пути повышения пластичности этих сплавов, основанные на применении термообработки в сочетании с деформационной обработкой.

## Процессы обработки давлением вторичных алюминиевых сплавов

Деформируемые вторичные алюминиевые сплавы обладают довольно высокой технологической пластичностью и сравнимы по своим свойствам с аналогами из первичного сырья, поэтому обработка их давлением не вызывает затруднений.

Имеется опыт [25, 15] отливки полуфабрикатов сплава АКМ и АКЦМ методом горизонтального непрерывного литья с дальнейшим прессованием через двенадцатиочковую матрицу. Как показали результаты исследования, при довольно низком уровне прочностных свойств чушки, свойства слитков непрерывного литья и прессованных полуфабрикатов находятся на уровне стандартных алюминиевых деформируемых сплавов. Произведенные горячим прессованием [15] из этих сплавов прутки и профили имеют высокие механические свойства и могут быть применены в конструкциях без термической обработки, что снижает стоимость продукции.

Хорошо обрабатываются методом прессования [26] деформируемые сплавы АК6г и Д1, полученные из вторичного сырья. Из сплава АК6г прессовали трубы, а из сплава Д1 прутки. Механические свойства полуфабрикатов из вторичных деформируемых сплавов не обнаружили существенной разницы с мехсвойствами аналогичных сплавов их первичного сырья.

Если задачу обработки давлением деформируемых вторичных алюминиевых сплавов можно считать во многом решенной, то в области обработки вторичных литейных алюминиевых сплавов все еще остаются проблемы, которые вызваны в первую очередь их пониженной пластичностью.

Ниже рассматриваются наиболее перспективные методы обработки давлением малопластичных алюминиевых сплавов, к которым относится большая часть алюминиевых сплавов, полученных из вторичного сырья.

Группой исследователей под руководством Артеса А.Э. [27] проведены эксперименты по обработке труднодеформируемых алюминиевых сплавов (в т.ч. и вторичных) методом холодной объемной штамповки (ХОШ).

В работе [28, 29] экспериментально доказано, что использование схем всестороннего неравномерного сжатия дает возможность деформировать вторичные алюминиевые сплавы в холодном состоянии без разрушения. Условия всестороннего неравномерного сжатия реализовывались в штампах с противодавлением. Были проведены эксперименты по прямому и обратному холодному выдавливанию труднодеформируемого вторичного алюминиевого сплава АКЗМЖМг с применением противодействия. В первом случае было использовано механическое противодействие, а во втором противодействие создавалось силами «сухого» трения заготовки по стенке матрицы. Были получены поковки типа стержней и стаканов с хорошим качеством поверхности.

Применялись два основных способа приложения противодействия [27]: к одной из физических поверхностей, ограничивающих очаг пластической деформации (боковая поверхность заготовки), или к поверхности свободного течения металла (передний торец поковки). Первый способ основан на «антиактивном» действии сил трения и экспериментально было установлено, что такое противодействие эффективно лишь при выдавливании поковок с небольшими (до 20–30%) степенями деформации.

В работе [27] предложены и испытаны следующие схемы создания противодействия:

- путем принудительного перемещения матрицы в процессе деформирования по схеме обратного выдавливания в направлении, противоположном направлению течения металла (степень деформации до 30%);
- путем саморегулирования давления в рабочей камере благодаря свободному перемещению бандажированной матрицы по плунжеру (степень деформации 90%);

— редуцированием изделия непосредственно перед выходом его из устройства во вспомогательной матрице, установленной в плунжере (суммарная степень деформации 75%, в т.ч. при редуцировании прутка 21%);

— создание постоянного противодействия с помощью верхней и нижней камер высокого давления с поршнями одинаковой площади.

Устройства были опробованы путем выдавливания стержневых образцов из сплава АК7 [27] и изделий типа стакан из сплава АК6 [22].

В работах [30-34] группа авторов под руководством Бережного В.Л. предлагают использовать для обработки давлением малопластичных алюминиевых сплавов (к которым относится подавляющее большинство производимых вторичных алюминиевых сплавов) технологии скоростного прессования с активно действующими силами трения (СПАТ). Эти процессы основаны на принципе использования деформационного трения между контейнером и металлом, с ориентацией этого трения в направлении истечения выдавливаемого металла, что обеспечивается кинематикой процесса.

По одной из предложенных схем [30] прессование осуществляется в условиях одновременного принудительного перемещения пресс-штемпеля и контейнера, причем скорость перемещения контейнера выше скорости перемещения пресс-штемпеля. В этом случае деформационное трение, поле действия которого охватывает боковую поверхность цилиндрической заготовки, активно, так как способствует течению металла.

Имеется ряд кинематических схем осуществления СПАТ [34], основанных на вышеизложенном принципе. Процессами СПАТ обрабатывались высоколегированные алюминиевые сплавы, отмечается [31] эффективность СПАТ труднодеформируемых алюминиевых сплавов по сравнению с обратным прессованием: повышение в 1,3–1,8 раза производительности; увеличение на 25–60% возможного числа каналов в матрице; повышение на 4–6% выхода годного; улучшение качества поверхности профилей и труб; значительное повышение уровня ресурсных характеристик пресс-изделий, в том числе с особым распределением по их длине механических свойств. Имеются проекты [32, 33] переоборудования традиционных прессов под скоростное прессование с активно действующим трением.

При производстве алюминиевых профилей неотвественного назначения представляется выгодным их изготовление из вторичных алюминиевых литейных сплавов с использованием горизонтального непрерывного литья [35, 36]. Такие профили могут быть использованы в качестве облицовочных и декоративных материалов. Этим способом также вполне могут быть получены прутки для раскисления стали. В работах [35, 36] экспериментально подтверждена возможность такого производства. В частности, непрерывным литьем из вторичного литейного сплава получали прутки, которые затем деформировали с относительным обжатием 50%, после чего их механические свойства значительно увеличивались: предел прочности на 40%, а пластичность возрастала в 6 раз. Отработка технологических параметров литья, термообработки и прокатки, вероятно, позволит получить профили в качестве несущих конструкций.

Жидкая штамповка — развивающийся высокоэффективный технологический процесс, имеющий значительные преимущества перед другими процессами обработки давлением, например перед горячей объемной штамповкой [37]. Он дает возможность изготовления деталей из труднодеформируемых или недеформируемых металлов. Суть процесса заключается в заливке расплава в матрицу пресс-формы с последующим воздействием на расплав прессующим пуансоном до окончания затвердевания формирующейся заготовки [38].

Использование вторичных алюминиевых сплавов при жидкой штамповке позволяет компенсировать снижение их механических свойств и довести их до уровня первичных.

В работе [39] были проведены исследования по разработке жидкой штамповки деталей различной конфигурации из вторичных алюминиевых сплавов. В частности, жидкой штамповкой были получены поршни колесных тормозных цилиндров из вторичного алюминиевого сплава ВАЛ10 взамен существующей технологии горячей штамповки этих поршней из прутков дюралюминия с последующей механической обработкой. Это позволило исключить необходимость применения дорогостоящего проката и в результате сократить трудовые затраты и повысить коэффициент использования металла.

Одним из направлений обработки давлением высоколегированных силуминов может служить изотермическая штамповка. Например, в статье [40] авторами разработаны технологические процессы изотермической штамповки деталей типа переходник из сплава АК8 в условиях мелкосерийного производства. Технологический процесс штамповки включает в себя подготовку заготовки, т. е. обезжиривание поверхности, подогрев, нанесение водно-графитового смазочного материала и нагрев в электропечи до штамповочной температуры  $460^{\circ}$ , смазывание нагретого рабочего инструмента масляно-графитовым смазочным материалом и деформирование заготовки в универсальном штамповом блоке со сменным рабочим инструментом. Использование изотермической объемной штамповки вместо производства деталей механической обработкой позволило уменьшить норму расхода материала в среднем в два раза.

В работе [41] авторы Соколов Л.Н. и Солоха А.Н. разработали технологический процесс получения качественных полуфабрикатов из недеформируемых вторичных алюминиевых сплавов.

Сущность процесса состоит в том, что прессованию подвергаются не слитки, используемые в традиционных способах производства, а заготовки из гранул-частиц круглой или удлиненной формы размером от 0,5 до 10 мм. Технологический процесс включает следующие операции: плавление отходов, грануляцию расплава, сушку, нагрев гранул и прессование.

Эксперименты, проведенные на сплавах АК5М4, АВ87 и АВ91 с использованием этого способа, показали возможность изготовления прессованных полуфабрикатов из недеформируемых вторичных алюминиевых сплавов при использовании промежуточного гранулирования сплавов. Причем механические характеристики прессованных из гранул профилей значительно повысились по сравнению с аналогичными показателями исходных сплавов.

Актуальным направлением использования алюминиевых отходов является разработка процессов производства деталей и высококачественных полуфабрикатов непосредственно из стружки, минуя ее переплав. В работе [42] предлагается две технологические схемы переработки стружки. Первая схема предполагает переработку стружки в порошок и изготовление изделия методами порошковой металлургии, а вторая предполагает изготовление изделий и полуфабрикатов непосредственно из стружковых заготовок в виде брикетов путем их горячей деформации.

### **Повышение технологической пластичности вторичных алюминиевых сплавов путем термообработки с последующим деформированием**

Повышение пластичности вторичных алюминиевых сплавов является сейчас одной из важнейших металлургических проблем в цветной металлургии. Существуют различные направления решения этой задачи:

- модифицирование различных фаз кристаллизационного происхождения (в процессе производства сплавов на металлургических заводах);
- технологические приемы при производстве отливок.

Повышение пластичности и вязкости при легировании загрязненных примесями сплавов можно добиться в результате изменения морфологии фаз кристаллизационного происхождения, образуемых малорастворимыми в алюминии примесями (в частности Fe, Ni и др.). Известно, например, что малые добавки ( $10^{-1}\%$ ) Mn, Cr, Вe и ряда других элементов делают более компактными выделения железосодержащих фаз в силуминах и за счет этого можно несколько повысить их пластичность.

Еще более кардинальных изменений в структуре вторичных алюминиевых сплавов можно добиться технологическими приемами, в том числе такими известными, как увеличение скорости охлаждения при кристаллизации, термическая, в том числе термоциклическая обработка под высоким давлением.

Весьма перспективными, с точки зрения повышения всех механических свойств, в первую очередь, характеристик пластичности и вязкости, представляются методы кристаллизации и термической обработки под высоким давлением [43]. При давлениях порядка  $10^9$  Па и более в алюминиевых сплавах можно добиться уже существенного увеличения растворимости легирующих элементов и примесей в твердом состоянии и, следовательно, получать принципиально новые структуры и свойства.

Например, в системе Al-Si при давлении  $10^9$  Па предельная растворимость кремния в алюминии увеличивается более чем в 2 раза [44]. Таким образом, в условиях кристаллизации (и высокотемпературной термической обработки) под давлением можно существенно уменьшить объемную долю хрупких избыточных фаз за счет увеличения легированности твердого раствора с соответствующим повышением всех механических свойств.

Известно, что при обеспечении дисперсной структуры повышенное содержание кремния в сложнелегированных сплавах не является недопустимым. Он имеет значительное химическое сродство с магнием, железом и марганцем и образует с ними фазы и соединения, которые могут охрупчивать сплав при наличии крупнокристаллической формы. Использование технологий, обеспечивающих дисперсность этих фаз, позволяет избежать снижения пластичности в сплавах с повышенным содержанием кремния, железа и других интерметаллидообразующих элементов.

Одним из таких методов повышения технологической пластичности алюминиевых сплавов из вторичного сырья является гетерогенизационный отжиг, кроме того его применение позволяет вести скоростное прессование труднодеформируемых алюминиевых сплавов [45, 46].

### **Гидропрессование — эффективный метод деформационной обработки малопластичных сплавов**

В плане обработки малопластичных сплавов выгодно отличается от известных методов деформирования процесс гидростатического прессования [47]. Он может быть использован как с целью повышения технологической пластичности литых заготовок, так и при получении заготовок и изделий из труднодеформируемых алюминиевых сплавов.

Можно выделить следующие наиболее общие преимущества этого процесса перед традиционными методами ОМД:

- всестороннее высокое гидростатическое давление на заготовку улучшает схему напряжённого состояния и снижает возможность появления областей с растягивающими напряжениями;
- исключается деформация осадки заготовки, что существенно для материалов с низкой пластичностью;
- гидродинамический режим трения в матрице повышает равномерность деформации и снижает затраты энергии на прессование, равномерность деформации при гид-



ропрессовании существенно выше, чем при обычном прессовании, а давление, при прочих равных условиях, на 20–40% ниже;

— деформирование металла в условиях всестороннего сжатия и малых сил трения обеспечивает равномерное распределение свойств по сечению и длине прессованного изделия, а также улучшает его физико-механические характеристики.

Процесс гидропрессования позволяет осуществить деформацию металлов с большими, существенно превышающими достигнутые при других методах ОМД, вытяжками за проход.

Гидростатическое прессование охватывает несколько технологических способов, а именно:

1. Обычное гидропрессование, при котором заготовка выдавливается из замкнутого объёма только под действием жидкости высокого давления. При обычном гидропрессовании материал деформируется при благоприятном напряжённом состоянии сжатия, при котором многие металлы можно подвергать чрезвычайно большим деформациям без разрушения. Способ имеет ряд недостатков. Процесс выдавливания проходит стабильно лишь при определённых соотношениях объёмов жидкости и заготовки, оптимальной скорости прессования и благоприятных условиях трения. Отсутствие жёсткой связи между плунжером и деформируемым материалом затрудняет регулирование скорости.

2. Гидромеханическое прессование, при котором, кроме давления рабочей жидкости, на деформируемый материал воздействует дополнительное усилие либо со стороны заготовки, как при обычном прессовании, либо со стороны изделия, как при волочении. При таком способе гидропрессования можно регулировать скорость перемещения заготовки в контейнере с помощью устройства, передающего дополнительное усилие заготовке или изделию. Кроме того, давление жидкости в контейнере на 10–20% меньше по сравнению с давлением обычного гидропрессования, вследствие чего напряжения во втулках контейнера снижаются также на эту величину.

3. Гидропрессование с противодавлением заключается в выдавливании заготовки в другой контейнер, заполненный жидкостью под давлением, меньшем, чем в основном контейнере. При этом способе реализуется схема деформирования металла при полном отсутствии растягивающих напряжений.

Процессы гидропрессования с противодавлением наиболее эффективны при обработке труднодеформируемых материалов, но они требуют более сложного оборудования.

Различные схемы гидростатического прессования, а также вышеотмеченные достоинства этого процесса, определяют возможность получения высококачественных прутков и проволоки из различных материалов с повышенным комплексом физико-механических свойств и с равномерным их распределением в продольном и поперечном направлениях.

В процессе пластической деформации происходит изменение тонкой структуры металла, возникают и развиваются микродефекты кристаллической решётки. Развитие микродефектов на определённой стадии деформирования приводит к возникновению трещины, которая и является причиной разрушения. Гидростатическое давление не только сдерживает образование и развитие микродефектов, но и приводит к залечиванию нарушений в кристаллической решётке. Это подтверждается исследованиями, проведёнными Бересневым Б.И. с сотрудниками [48] при сравнении свойств гидропрессованных и волочённых меди и алюминия. Более высокая гидростатическая компонента напряжений при выдавливании по сравнению с волочением способна подавлять образование и развитие микродефектов типа пор и трещин или, напротив, создавать большую плотность дислокаций при более благоприятном их распределении в об-

рабатываемом материале. Однако, высокие давления, не сопровождаемые пластической деформацией, не устраняют пор и трещин в материалах [49, 50].

Сравнивая величину зерна у прутков из сплава алюминия с 1% магния после холодного гидропрессования с величиной зерна у таких же прутков, полученных обычным прессованием при температуре 400<sup>0</sup>С, авторы [51] отмечают, что в первом случае величина зерна в 60 раз меньше. Предел прочности этого сплава после гидропрессования был в 1,3–2,4 раза, а пластичность в 2,5–4,0 раза выше, чем после обычного горячего прессования.

Такие же результаты получены в работе [52], где отмечено повышение пластичности молибдена после гидропрессования благодаря развитию текстуры.

В работе [53] показано, что с увеличением давления гидропрессования при выдавливании образцов из алюминия марки АД1 со степенями деформации до 90% пластичность алюминия увеличивается.

Таким образом, введение методов ОМД в процесс переработки вторичных алюминиевых сплавов позволит резко увеличить номенклатуру и качество получаемых из них изделий. Основная проблема, стоящая на пути к полномасштабному внедрению методов ОМД – малая технологическая пластичность большинства вторичных алюминиевых сплавов. Решение этой проблемы возможно путем термообработки этих сплавов в сочетании с их последующей деформационной обработкой под высоким давлением. Одним из наиболее эффективных методов деформационной обработки малопластичных алюминиевых сплавов является процесс гидропрессования.

### Список литературы

1. Давыдов В.Г. Современное состояние и некоторые актуальные проблемы исследования алюминиевых сплавов // Цветные металлы, 1999. — № 8. — С. 49–53.
2. Antony E. Paterson. — Aluminium world, 2002. — V.1. — № 2. — P. 112–113.
3. Попов А.В. Видовая структура и химический состав перерабатываемого алюминиевого сырья // Цветные металлы, 1986. — № 6. — С. 12–15.
4. TMS 2002 131<sup>ST</sup> Annual Meeting & Exhibition. FINAL PROGRAM. // JOM, 2002 V. 54 #2 P. 81–404.
5. Рытиков А.М. Получение деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, выплавленных из смешанных низкосортных отходов и лома // Цветные металлургия, 1985. — № 1. — С. 46–47.
6. Карпачев Д.Г. О совершенствовании производства вторичного алюминия // Цветные металлы, 1986. — № 6. — С. 59–63.
7. Попов В.А. К оценке направлений использования ломов и отходов при производстве алюминиевых сплавов // Цветные металлы, 1986. — № 6. — С. 64–65.
8. Лобанов В.С. Вторичная цветная металлургия – постоянный источник воспроизводства металла // Цветные металлы, 1986. — № 9. — С. 96–97.
9. Рутнам М.М., Шадрин Г.Г., Гольдбухт Г.Е. Совершенствование плавки и литья вторичных алюминиевых деформируемых сплавов // Цветные металлы, 1985. — № 5. — С. 87–89.
10. Ананьин С.Н. О перспективах производства алюминиевых сплавов на основе вторичного сырья // Цветные металлы, 1978. — № 8. — С. 90–92.
11. Ананьин С.Н., Бывалов А.А., Багатова А.Д. Рациональное использование алюминиевого лома // Цветные металлы, 1978. — № 12. — С. 78–80.
12. Ананьин С.Н., Ефремов Н.Л. Вторичные алюминиевые деформируемые сплавы // Цветные металлы, 1972. — № 11. — С. 64–65.
13. Полтораки Л.И., Радзиховский В.А., Циргвава Ю.И., Шулек Т.И. Исследование механических свойств алюминиевых слитков из вторичного сырья // Цветные металлы, 1982. — № 11. — С. 87–88.
14. Чулков В.С. Рациональное использование вторичного алюминиевого сырья для производства деформируемых алюминиевых сплавов // Цветные металлы, 1982. — № 6. — С. 22–24.
15. Ананьин С.Н., Бывалов А.А., Ефремов Н.Л., Гаранович В.А. Производство прутков и профилей из сплавов АКМ и АКЦМ // Цветные металлы, 1974. — № 11. — С. 68–70.
16. Ананьин С.Н., Гольдбух Г.Е. Свойства и применение вторичных алюминиевых деформируемых сплавов // Цветные металлы, 1985. — № 2. — С. 87–89.

17. Баланаева Н.А., Бычков Ю.Б., Голубятников М.И., Купершток Ю.Е., Циргвава Ю.И. Использование вторичного алюминиевого сплава с повышенным содержанием цинка // Цветные металлы, 1985. — № 6. — С. 92–93.
18. Гольдбухт Г.Е., Ананьин С.Н. Новые вторичные алюминиевые деформируемые сплавы // Цветные металлы, 1984. — № 9. — С. 75–76.
19. Бадаев В.Г., Эйдук Н.Ю. О расширении использования сплавов из вторичного сырья для изготовления деформированных полуфабрикатов // Цветные металлы, 1985. — № 6. — С. 90–92.
20. Утяшев Ф.З., Трифонов В.Г., Михайлов С.И. Раскатка дисков автомобильных колес из алюминиевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство, 1999. — № 4. — С. 36–40.
21. Трифонов В.Г., Нечаев С.С., Шалай А.Н., Шерман Я.И. Опыт штамповки поршней двигателей внутреннего сгорания из сложнлегированных силуминов // Кузнечно-штамповочное производство, 1990. — № 6. — С. 33–34.
22. Артес А.Э., Аюпов Т.Х., Бенедиктов И.А. Точная объемная штамповка деталей в мелкосерийном производстве // Кузнечно-штамповочное производство, 1997. — № 11. — С. 21–22.
23. Гафуров Р.М., Михаленко Ф.П. Прогрессивные технологии холодной объемной штамповки в ОАО «ГАЗ» // Кузнечно-штамповочное производство, 2000. — № 4. — С. 12–14.
24. Ананьин С.Н., Бывалов А.А., Циргвава Ю.И., Богатова А.Д., Борзакова Т.И. Качество полуфабрикатов сплава АКМ, отлитых методом горизонтального непрерывного литья // Цветные металлы, 1983. — № 7. — С. 80–81.
25. Гафуров Р.М., Михаленко Ф.П. Прогрессивные технологии ХОШ в ОАО «ГАЗ» // Кузнечно-штамповочное производство, 2000. — № 4. — С. 17–19.
26. Андреев А.Д., Савин В.В., Ходаков П.Е., Чулков В.С., Шилов В.С. Опыт производства высоколегированных алюминиевых // ВИЛС, 1977. — № 9. — С. 14–16.
27. Артес А.Э., Серов С.Э., Сцепура В.И., Зивзивадзе Б.Л. Холодная объемная штамповка поковок из малопластичных алюминиевых материалов // Кузнечно-штамповочное производство, 1993. — № 4. — С. 13–15.
28. Зивзивадзе Б.Л. Холодное выдавливание малопластичных алюминиевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство, 1990. — № 1. — С. 31–32.
29. Артес А.Э., Бадаев В.Г., Тханг Ле Као, Никитин А.Г. Точная объемная штамповка деталей машиностроения из вторичных алюминиевых сплавов // Технология, организация и экономика машиностроительного производства, 1985. — № 10. — С. 12–15.
30. Бережной В.Л. Возможности и проблемы технологии прессования профилей из высоколегированных алюминиевых сплавов // Цветные металлы, 1993. — № 8. — С. 42–44.
31. Бережной В.Л. Управляемые процессы скоростного прессования труднодеформируемых алюминиевых сплавов на базе реконструированных прессов // Кузнечно-штамповочное производство, 2001. — № 4. — С. 42–43.
32. Бережной В.Л. Проекты переоборудования традиционных процессов под скоростное прессование с активно действующим трением // Кузнечно-штамповочное производство, 2001. — № 10. — С. 44–46.
33. Охрименко Я.М., Бережной В.Л., Щерба В.Л., Шариков Г.С. Новый процесс скоростного прессования малопластичных сплавов // Кузнечно-штамповочное производство, 1972. — № 1. — С. 6–9.
34. Бережной В.Л. Условия разработки и оптимального проектирования технологии прессования с активным действием сил трения // Кузнечно-штамповочное производство, 2001. — № 7. — С. 11–18.
35. Радзиховский В.А., Чумаченко В.С., Гудкевич В.М. Производство профилей из литейных алюминиевых сплавов, выплавляемых из лома и отходов // Цветные металлы, 1973. — № 5. — С. 91–92.
36. Радзиховский В.А., Полторак Л.И., Шкатов В.Ф. Элементы строительных конструкций из алюминиевых сплавов, выплавляемых из вторичного сырья // Цветные металлы, 1973. — № 9. — С. 69.
37. Кирдеев Ю.П., Зимин В.В., Гримин А.В. Оценка внешнего давления на заготовку при штамповке изделий из кристаллизующегося алюминия // Кузнечно-штамповочное производство, 2000. — № 11. — С. 11–13.
38. Батышев А.И. Штамповка жидкого металла: традиционные и нетрадиционные процессы // Кузнечно-штамповочное производство, 1998. — № 4. — С. 7–11.
39. Тимофеев Г.И., Светов В.В., Чувагин Н.В., Марков В.В., Савинова Е.Г. Использование вторичных сплавов при жидкой штамповке // Цветная металлургия, 1989. — № 10. — С. 42–43.
40. Евстифеев В.В., Кокоулин В.П., Лобас В.Н. Изотермическая штамповка корпусных деталей из алюминиевого сплава АК8 // Кузнечно-штамповочное производство, 1990. — № 9. — С. 6–7.
41. Соколов Л.Н., Солоха А.Н. Профили из недеформируемых алюминиевых сплавов // Кузнечно-штамповочное производство, 1991. — № 4. — С. 6–7.

42. Шестаков Н.А., Сергеев Ю.Н., Тимофеев В.Н., Седунов В.К., Жуков О.В. Прессование профилей из стружки цветных металлов // Кузнечно-штамповочное производство, 1986. — № 10. — С. 36–37.
43. Шиняев Л.Я., Литвинцев А.И., Пивкина О.Г. Исследование структуры и свойств сплавов системы Al-Si при кристаллизации под высоким давлением // ФТВД, 1982. — № 8. — С. 86–89.
44. Золоторевский В.С., Бычков Р.Б. О перспективах использования литейных алюминиевых сплавов из вторичного сырья взамен сплавов из первичных металлов // Цветные металлы, 1986. — № 6. — С. 7–10.
45. Захаров В.В., Кукушкин Ю.Н., Царев А.И., Фисенко И.А. Скоростное прессование труднодеформируемых алюминиевых сплавов // Цветные металлы, 1985. — № 8. — С. 103–106.
46. Елагин В.И., Захаров В.В., Кукушкин Ю.Н. Некоторые металлургические вопросы прессования алюминиевых сплавов // Цветные металлы, 1981. — № 8. — С. 72–74.
47. Береснев Б.И., Езерский К.И., Трушин Е.В., Каменецкий Б.И. Высокие давления в современных технологиях обработки материалов. — М.: Наука, 1988. — 245 с.
48. Береснев Б.И., Булычев Д.К. Механические свойства алюминия и меди после выдавливания их жидкостью высокого давления // Физика металлов и металловедение, 1963. — 16, вып. 1. — С. 117–123.
49. Булычев Д.К., Береснев Б.В., Гайдуков М.Г. и др. О возможности залечивания пор и трещин в металлах в процессе пластической деформации под высоким гидростатическим давлением // Физика металлов и металловедение, 1964. — 18, вып. 3. — С. 778–783.
50. Булычев Д.К., Береснев Б.В., Гайдуков М.Г. Дефекты структуры и пластическая деформация меди при высоких давлениях // Докл. АН СССР, 1964. — Т. 156. — № 1. — С. 67–71.
51. Механические свойства материалов под высоким давлением // Под ред. Х.И. Пью. — М.: Мир, 1973 (В пер.). Вып. 2.: Применение высоких давлений в технологических процессах. — 370 с.: ил.
52. Мочалов Г.А., Мартынов Е.Д., Береснев Б.И. Механические свойства молибдена после гидроэкструзии // Физика металлов и металловедение, 1968. — 25, вып. 2. — С. 357–360.
53. Береснев Б.И., Верещегин Л.Ф., Рябинин Ю.Н. О влиянии гидростатического давления на изменение механических свойств алюминия после больших пластических деформаций // Физика металлов и металловедение, 1959. — вып. 1. — С. 128–132.

© Шевелев А.И., 2003

УСЕНКО Ю.И., ИВАНОВ В.И., СКАЧКОВ В.А., КОВАЛЬ Н.В., ТИЩЕНКО П.И., ТИМОШЕНКО С.Н. (НМЕТАУ, Г.ДНЕПРОПЕТРОВСК, ЗГИА, Г.ЗАПОРОЖЬЕ, ДОННТУ, Г.ДОНЕЦК)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОТЖИГА СТАЛЬНОГО ПРОКАТА В БУНТАХ И РУЛОНАХ<sup>1</sup>

*Представлены результаты экспериментальных исследований и электротеплового моделирования тепловой работы одностопных колпаковых электропечей типа СГЗ и ПСК-210 при отжиге стального проката в бунтах и рулонах.*

Повышение требований к качеству отжига проволоки в бунтах и холоднокатаной ленты в рулонах вызывает необходимость совершенствования тепловой работы оборудования для его реализации.

В сталепроволочном цехе ОАО «Запорожский сталепрокатный завод» отжиг бунтов проволоки марки БСтОМ различных типоразмеров осуществляют в одностопных электропечах типа СГЗ с равномерным размещением установленной мощности (180 кВт) в двух зонах по высоте нагревательного колпака. Проволоку загружают в стопу из трех бунтов массой до 1,0 т и отжигают по режиму, предусматривающему на-

<sup>1</sup> В работе принимали участие Ю.Ф.Горшков, В.И.Кулибанов, П.И.Назар, А.А.Яковлев и В.А.Скуднов