

УДК 621.771:621.777

Ways of Processing of Friable Scrap Waste of Alloy AD31 for Making Semi-Finished Products and Products of Various Applications

Evgeny V. Ivanov*,
Nikolay N. Zagirov and Ivan N. Gigel
Siberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

Received 28.02.2017, received in revised form 21.03.2017, accepted 04.05.2018

Laboratory testing of using friable chip waste of alloy system aluminum-magnesium-silicon for making semi-finished products and products of various functional application without conventionally used melting processing was carried out. The general technological scheme and its adaptation for special features of the deformation processes and structural changes depending on the composition of compacted material were created. The main parameters of each operation of the general scheme were chosen. Pilot product items were made, mechanical testing of selected samples for tension and compression and metallographic research were performed, necessary for further development of each of the above approaches.

Keywords: aluminum alloy, friable chip waste, briquetting, extrusion, drawing, mechanical properties, modification, structure, foaming, porosity.

Citation: Ivanov E.V., Zagirov N.N., Gigel I.N. Ways of processing of friable scrap waste of alloy AD31 for making semi-finished products and products of various applications, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2019, 12(4), 386-397. DOI: 10.17516/1999-494X-0073.

Основные подходы по переработке сыпучих стружковых отходов сплава АД31 в полуфабрикаты и изделия различного назначения

Е.В. Иванов, Н.Н. Загиров, И.Н. Гигель
Сибирский федеральный университет
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Проведена апробация в лабораторных условиях нескольких вариантов использования сыпучих стружковых отходов из сплава системы алюминий-магний-кремний для получения

полуфабрикатов и изделий различного функционального назначения, минуя традиционно применяемый плавильный передел. Разработаны общая технологическая схема и ее модификации, учитывающие особенности протекания деформационных процессов и структурных изменений в зависимости от состава компактируемого материала. Выбраны значения основных параметров, характеризующих условия осуществления каждой из входящих в общую схему операций. Для каждого случая получены опытные образцы продукции, проведены механические испытания специально отобранных образцов на растяжение и сжатие, выполнены необходимые металлографические исследования, служащие в совокупности основой для дальнейшего развития каждого из рассмотренных в работе подходов.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, сыпучие стружковые отходы, брикетирование, экструзия, волочение, механические свойства, модифицирование, структура, вспенивание, пористость.

Введение

Как известно, российская алюминиевая отрасль остается наиболее преуспевающей из отечественных металлургических отраслей. После небольшого спада наращиваются объемы производимой из алюминия и его сплавов продукции, а следовательно, возрастают и объемы отходов, сопутствующих производству изделий. В этой связи перед металлообрабатывающими предприятиями все острее встают задачи, связанные с совершенствованием существующих технологий переработки отходов производства, а также разработкой более эффективных, возможно принципиально новых, ее видов.

При рассмотрении данного вопроса возможны два концептуально разных подхода. Один из них заключается в рационализации традиционного пути переработки любого типа металлических отходов через их переплав в свободнотекучем или брикетированном виде. Недостатки его хорошо известны, и связаны они, в первую очередь, с повышенным угаром металла, значительными энергетическими затратами, большой трудоемкостью, а также экологическим несовершенством плавильного передела [1].

Другой вариант базируется на комбинировании приемов порошковой металлургии и процессов обработки металлов давлением, ключевая роль при реализации которого, как показывает накопленный опыт [2], отводится выполнению при определенных условиях операции выдавливания материала через матрицу (экструзия), имеющую заданное сечение рабочего отверстия. Потенциально возможными направлениями развития технологии по указанному пути, на наш взгляд, являются следующие. Во-первых, это изготовление прутково-проволочной продукции неотчетливого назначения непосредственно из образующихся отходов в виде, например, стружки без ее переплава и применения каких-либо добавок. Во-вторых, это использование стружковых отходов как основы для введения в соответствующие расплавы специальных порошковых составляющих, например, модифицирующего назначения путем предварительного формирования из смеси стружки с порошком прутков или проволоки определенного диаметра. В-третьих, это получение из стружковых отходов в конечном итоге высокопористых материалов за счет предварительного введения в состав стружки особого рода веществ-порофоров, дальнейшего компактирования сформированной сыпучей массы в промежуточные, достаточно плотные полуфабрикаты и проведения на заключительном этапе так называемой операции вспенивания, в результате которой и формируется, условно говоря, пористый металлический каркас.

Методика проведения исследований

Перечисленные выше подходы были опробованы применительно к переработке сыпучей стружки (опилок) из сплава АД31, образующейся при резке прессованных профилей на мерные длины на ООО «ЛПЗ «Сегал». Для удаления следов СОЖ стружка предварительно была промыта в содовом растворе.

В качестве вводимой добавки модифицирующего назначения использовали исследованный ранее [3] ультрадисперсный порошок, представляющий собой смесь солей NaF и AlF_3 с оксидами ZrO_2 , TiO_2 , Nb_2O_5 . Для получения высокопористого материала на основе алюминия в качестве порошка-порофора применяли рекомендуемый для этих целей [4] промышленный гидрид титана TiH_2 .

В обобщенном виде рассмотренные в работе варианты изготовления продукции различного назначения приведены на рис. 1. Все они прошли апробацию в лабораторных условиях кафедры «Обработка металлов давлением» СФУ. Были изготовлены опытные образцы продукции, проведены соответствующие механические испытания и металлографические исследования. При этом акцент в первую очередь был сделан на отработку базовой схемы получения горячепрессованного прутка из стружки сплава АД31 без использования каких-либо добавок,

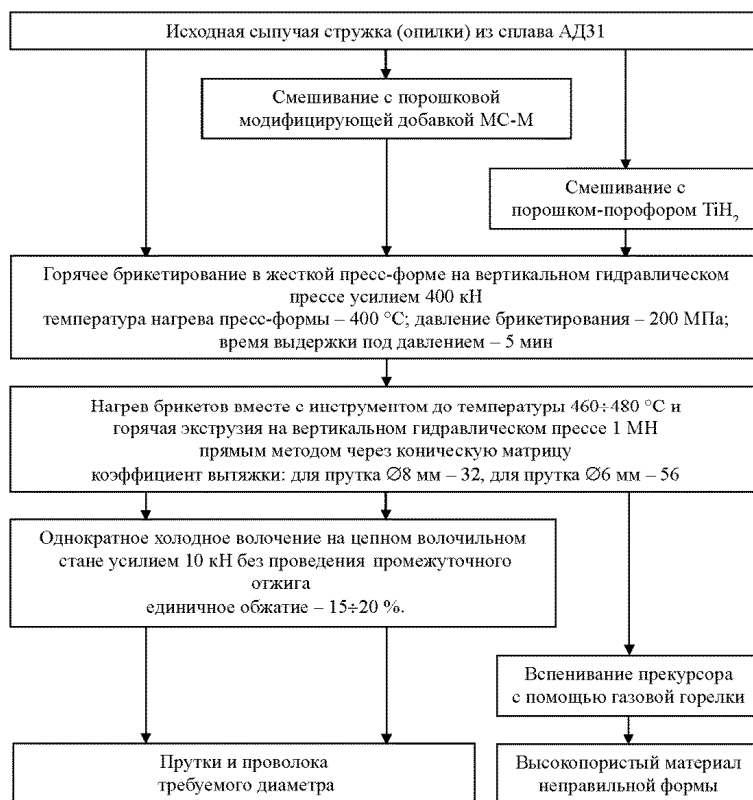


Рис. 1. Обобщенная схема опробованных вариантов изготовления продукции различного назначения на основе сыпучей стружки сплава АД31

Fig. 1. Generalized chart of tested ways of making products for different purposes from friable aluminum alloy AD31 chip waste

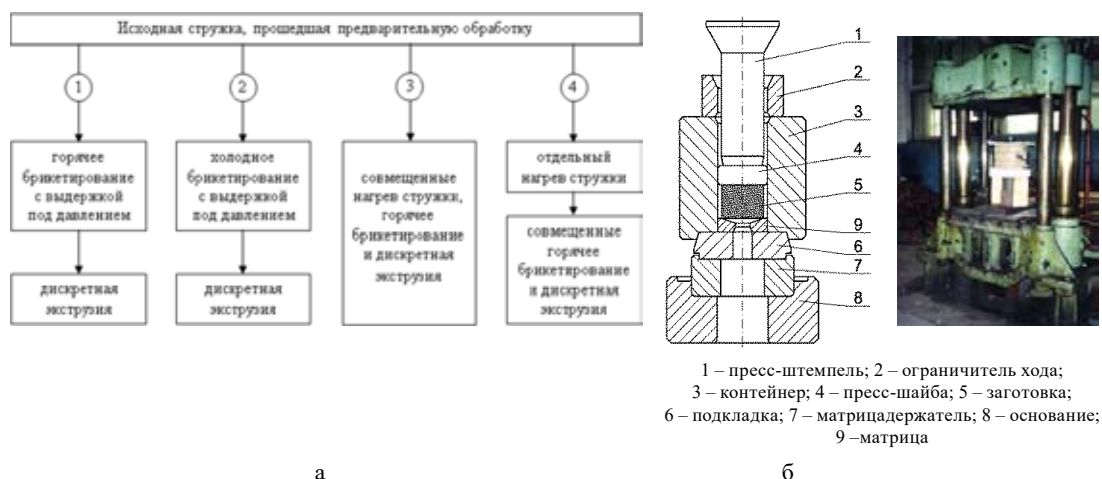


Рис. 2. Рассмотренные варианты реализации процесса экструзии (а) и установка, используемая для их осуществления (б)

Fig. 2. Considered options of extrusion process (a) and facilities for their implementation (b)

в частности, на четырех потенциально возможных ее модификациях, схематично отображенных на рис. 2а. При их реализации использовали инструментальную оснастку, показанную на рис. 2б. Температура и скорость деформации, при которых происходила экструзия, каждый раз были идентичными и соответствовали параметрам, рекомендуемым для прессования литых заготовок из сплава АД31 [5].

Коэффициент вытяжки при экструзии для данного этапа работы составлял 56, диаметр прутка был равен 6 мм. Полученные горячей экструзией прутки в дальнейшем подвергали холодному однократному волочению на цепном волочильном стане со средним единичным обжатием 15÷20 %.

Результаты исследования и их обсуждение

На первом этапе из отображенных на рис. 2а вариантов были проанализированы схемы под цифрами 1 и 2, отличающиеся условиями брикетирования стружки. На рис. 3 показано изменение в зависимости от накопленной степени деформации ϵ временного сопротивления разрыву σ_B , относительного удлинения δ и относительного сужения ψ холоднотянутой проволоки, исходными заготовками для которой служили прутки $\varnothing 6$ мм, полученные отдельно из горяче- (рис. 3а) и холоднобрикетированной (рис. 3б) стружки.

Из рис. 3 следует, что в интервале суммарных относительных обжатий до 80 % характер указанных зависимостей принципиально для двух рассмотренных случаев не различается и в целом имеет общераспространенный для холодной обработки вид. В результате прочность проволоки на конечных размерах $d_{\min} = 3,0$ мм достигает значений $\sigma_B = 230 \div 240$ МПа. При этом пластичность снижается до уровня, соответствующего значениям $\delta = 2 \div 5$ % и $\psi = 15 \div 17$ %.

В этой связи определенный интерес вызывает сопоставление свойств прутково-проволочной продукции, получаемой из той же стружки сплава АД31, но с применением на стадии реализации процесса экструзии и других возможных технологических схем, ото-

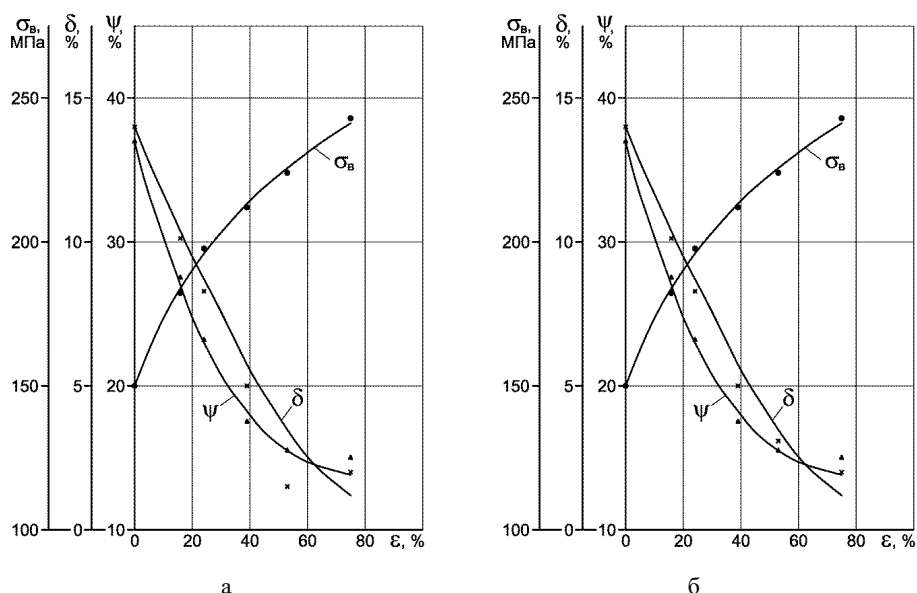


Рис. 3. Изменение механических характеристик прутков и проволоки из горяче- (а) и холоднбрикетированной (б) стружки сплава АД31 после горячей экструзии ($\epsilon = 0$) и холодного волочения в зависимости от накопленной степени деформации

Fig. 3. Change of mechanical characteristics of bars and wire from hot (a) and cold packed chip (б) of alloy AD31 after hot extrusion ($\epsilon = 0$) and cold drawing depending on the deformation degree

браженных на рис. 2а. Сравнение в данном случае производили на нескольких диаметрах холоднформированной проволоки, в частности $\varnothing 4,7$ мм (суммарное относительное обжатие ϵ на этот момент составляло 39 %); $\varnothing 4,1$ мм ($\epsilon = 53$ %) и $\varnothing 3,0$ мм ($\epsilon = 75$ %). Результаты проведенных механических испытаний в виде соответствующих диаграмм представлены на рис. 4.

Анализ приведенных данных свидетельствует о том, что существенных отличий в свойствах проволоки, изготовленной волочением из прутков, полученных с использованием упомянутых выше вариантов осуществления процесса экструзии, не наблюдается. Исключение составляет проволока, полученная с применением варианта под цифрой 4, у которой, независимо от диаметра, прочностные и пластические свойства заметно ниже, чем у трех других. Видимо, это объясняется тем, что реализуемые по этому варианту действия, связанные с переносом нагретой стружки от отдельно стоящей печи к прессу, засыпкой ее в разогретую до определенной температуры пресс-форму, сборкой ее и включением привода перемещения подвижного пуансона, требуют существенных временных затрат. В результате происходят неизбежные потери тепла, и температурные условия осуществления процесса экструзии будут несколько отличаться от трех других случаев, которые фактически характеризуются изотермическими условиями протекания процесса. При этом четвертый вариант можно считать наиболее производительным, поскольку общее время цикла экструзии в этом случае будет наименьшим. В этой связи на первый план выходят уже технико-экономические показатели реализации того или иного процесса, по которым потенциально наиболее перспективным следует признать вариант осуществления процесса экструзии в

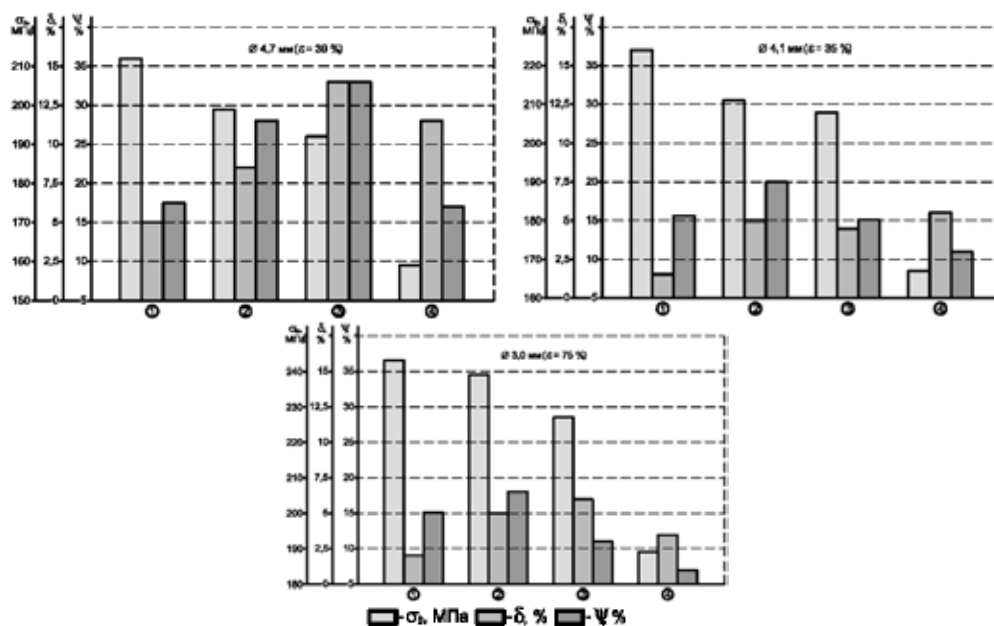


Рис. 4. Сравнительная диаграмма механических характеристик проволоки из стружки сплава АД31 в зависимости от способа осуществления горячей экструзии и суммарного относительного обжатия при волочении (цифры внизу соответствуют номеру варианта реализации процесса экструзии по рис. 2а)

Fig. 4. Comparative chart of mechanical characteristics of wire from alloy AD31 chip depending on the way of hot extrusion and total reduction of cross-sectional area in drawing (the numerals below correspond to the variant of extrusion process according to Fig. 2a)

полунепрерывном или непрерывном режимах, либо на вертикальных или горизонтальных гидравлических прессах, либо на специальных установках типа «Конформ» [6] или «Экстроллинг» [7].

Следующий этап работы был связан с исследованием одного из гипотетически возможных вариантов модифицирования сплава АД31 за счет введения в расплав специально сформированной для этой цели порошковой смеси, названной разработчиками МС-М [3], которая включает в свой состав дисперсные частицы тугоплавких компонентов с добавлением солей и рафинирующих реагентов. Процесс ввода такой комбинированной порошковой смеси сопровождается ее активным взаимодействием с материалом основы, что способствует равномерному распределению частиц смеси в объеме расплава и одновременно удалению неметаллических включений [8]. Предварительно указанную смесь смешивали с сортной сыпучей стружкой сплава АД31, после чего с использованием одной из рассмотренных выше схем (на рис. 2а под цифрой 1) изготавливали прутки диаметрами 6 и 8 мм. Содержание вводимой в стружковую основу порошковой смеси МС-М составляло 2, 5, 8, 10 и 15 % (по массе). Перемешивание компонентов в заданной пропорции осуществляли механическим способом. Макроструктура некоторых из полученных прутков разного диаметра и состава приведена в табл. 1. В целом она представляет собой относительно неоднородное распределение частиц порошковой смеси вдоль вытянутых в направлении истечения из матрицы частиц стружек материала основы. При этом прутки с содержанием порошковой смеси МС-М от 2 до 10 % были получены практически

без макродефектов поверхности, разрывы поверхности наблюдались только при содержании смеси 15 %.

В дальнейшем при оценке модифицирующего эффекта от введения в расплав лигатурного прутка из смеси сыпучей стружки сплава АД31 и порошковой смеси МС-М решено было использовать прутки диаметром 8 мм, а за основу принять данные применяемого в этих случаях Alcan-теста. К сожалению, по объективным причинам провести указанные исследования в полном объеме не удалось, поэтому ниже приведены данные Alcan-теста, полученные при введении прутка диаметром 8 мм, содержащего только 2 % порошковой смеси МС-М. На рис. 5 представлены макроструктуры Alcan-тест проб сплава АД31 без проведения модифицирования лигатурным прутком (рис. 5а) и после применения модифицирования расплава рассматриваемым способом (рис. 5б).

На рис. 5 видно, что макроструктура пробы, отлитой без модифицирования прутком со смесью МС-М, имеет более крупное столбчатое строение по сравнению с макроструктурой пробы, отлитой с модифицированием прутком, содержащим всего 2 % смеси. Размер зерна в модифицированной пробе составляет (850 ± 100) мкм, что соответствует измельчению зерна на 60 %. При этом в литниковой части слитка, а также средней и центральной зонах поперечно-

Таблица 1. Макроструктура прутков с разным содержанием введенной в стружковую основу смеси МС-М

Table 1. Macrograph of bars with different content of MC-M mixed in chip waste











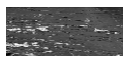
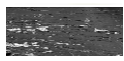
Поперечное сечение						
Долевое сечение						
Содержание МС-М, %	2	2	5	8	10	15
Диаметр прутка, мм	6	8	8	8	8	8



Рис. 5. Макроструктура Alcan-теста проб сплава АД31 без модифицирования (а) и с модифицированием расплава лигатурным прутком диаметром 8 мм из смеси алюминиевой стружки и 2 % порошковой смеси (б)

Fig. 5. Macrograph of alloy AD31 samples test without (a) and with inoculation of the melt by alloying bar 8 mm in diameter from aluminum chip mixed with 2 % powder (б)

го сечения имеются участки крупнозернистой структуры. Таким образом, можно сказать, что эффект модифицирования слитка лигатурой из смеси стружки и порошковой добавки имеет место быть, но носит он достаточно локальный характер.

Заключительная часть работы была посвящена практическому опробованию принципиально новой схемы переработки стружки (опилок) алюминиевого сплава АД31 в высокопористые полуфабрикаты произвольной формы. В качестве вещества-порофора, как уже отмечалось выше, решено было использовать промышленный гидрид титана TiH_2 , для которого содержание водорода в этой фазе составляет по объему больше 60 % (~4 мас %), а температура интенсивного разложения (дегидрирования) находится в интервале (650÷700) °С [9].

Смешивание алюминиевой стружки и порошка гидрида титана производили в планетарной шаровой мельнице Retsch PM400 в три этапа с разными интервалами времени – 5,30 и 50 мин. Предварительные эксперименты [10] и анализ имеющихся в литературе [11] сведений по этому вопросу показали, что из-за существования высокой вероятности получения материала со связанными между собой порами вместо изолированных содержание вводимого в алюминиевую основу гидрида титана не должно превышать 2 % (по массе), которое и было принято в работе.

В результате были получены прутки диаметрами 6 мм (коэффициент вытяжки μ при этом приблизительно составлял 56), 8 мм ($\mu \approx 32$) и 12 мм ($\mu \approx 14$). При этом независимо от того, с каким коэффициентом вытяжки осуществлялась горячая экструзия и какое время смешивания принималось при формировании смеси перед горячим прессованием, прутки экструдировались по описанному выше технологическому режиму достаточно устойчиво.

Последующую стадию получения высокопористого алюминия – вспенивание прекурсора проводили с помощью газовой горелки Namilux, работа которой обеспечивает требуемое тепловое воздействие для достижения необходимой температуры при высокой скорости нагрева. На рис. 6 приведены общие виды образцов пресс-изделий до и после осуществления процесса вспенивания.

Установлено, что в процессе интенсивного высокотемпературного воздействия образец разбухает, одновременно теряя цилиндрическую форму. При этом, как видно из приведенного на рис. 6в разреза образца пресс-изделия после вспенивания, выделяющийся водород не успе-



Рис. 6. Внешний вид образцов пресс-изделий после различных этапов обработки: а – после горячей экструзии; б – после осуществления процесса вспенивания; в – поперечный разрез образца пресс-изделия после вспенивания

Fig. 6. Physical configuration of molded pieces after different stages of processing: а – after hot extrusion; б – after foaming process; в – cross-section of molded piece after foaming

вает сформировать поры правильной сферической формы. Неодинаковость пустот по размерам и их крайняя неравномерность распределения по сечению объясняются наличием в объеме пресс-изделия крупных и неоднородных скоплений частиц TiH_2 , из которых моментально образуется большое количество газа. При этом выделяющийся водород не успевает весь раствориться в матрице, в результате чего поры и получаются сравнительно большими и не совсем правильной формы.

Поскольку в работе ставилась задача – создать модель высокопористого материала на основе алюминия предположительно конструкционного назначения, была произведена оценка прочностных характеристик образцов пресс-изделий на сжатие до и после проведения вспенивания. Полученные по результатам механических испытаний соответствующих образцов диаграммы в координатах «напряжение течения – степень деформации сдвига» в зависимости от упоминавшихся выше варьируемых параметров приведены на рис. 7.

На рис. 7а видно, что наибольшим сопротивлением деформации обладает пруток $\varnothing 8$ мм, полученный с коэффициентом вытяжки $\mu = 32$. По-видимому, именно при этой вытяжке удастся обеспечить наиболее устойчивые связи между отдельными частицами алюминиевой стружки, определяющими общую прочность формируемых пресс-изделий. Время перемешивания при составлении смеси алюминиевой стружки с порошком гидрида титана (рис. 7б) принципиального влияния на уровень прочностных свойств пресс-изделий не оказывает, поскольку наибольшие значения указанных характеристик приходятся на минимально принятое в работе время перемешивания, равное 5 мин. Результаты, полученные в ходе выполнения этой части работы, являются только промежуточными, поскольку на ход осуществления рассматриваемого процесса оказывает влияние большое число факторов, которые не были изучены.

Выводы

1. Применительно к переработке сыпучих стружковых отходов сплава АД31 в полуфабрикаты и изделия круглого поперечного сечения, исключаяющей стадию переплава, возможны различные варианты перевода стружки в относительно компактное состояние. Эти варианты, реализующие в своей основе единый принципиальный подход, отличаются по сути только условиями проведения ключевой в предлагаемой схеме технологической операции – экструзии.

2. В ходе практического опробования было установлено, что с точки зрения формирования определенного уровня механических характеристик прутково-проволочной продукции принципиальной разницы, проводить ли отдельно предварительное горячее или холодное брикетирование стружки, или же засыпать стружку сразу в контейнер и совмещать горячее брикетирование с экструзией, нет. Важно в любом случае обеспечить только заданные температурно-скоростные условия деформации в момент начала истечения металла из рабочего отверстия матрицы.

3. Одной из возможных областей практического применения прутково-проволочной продукции из стружковых отходов сплава АД31 является использование ее как основы для введения в соответствующие расплавы специальных порошковых смесей модифицирующего назначения. Проведенное в работе опробование данного подхода с использованием смеси МС-М

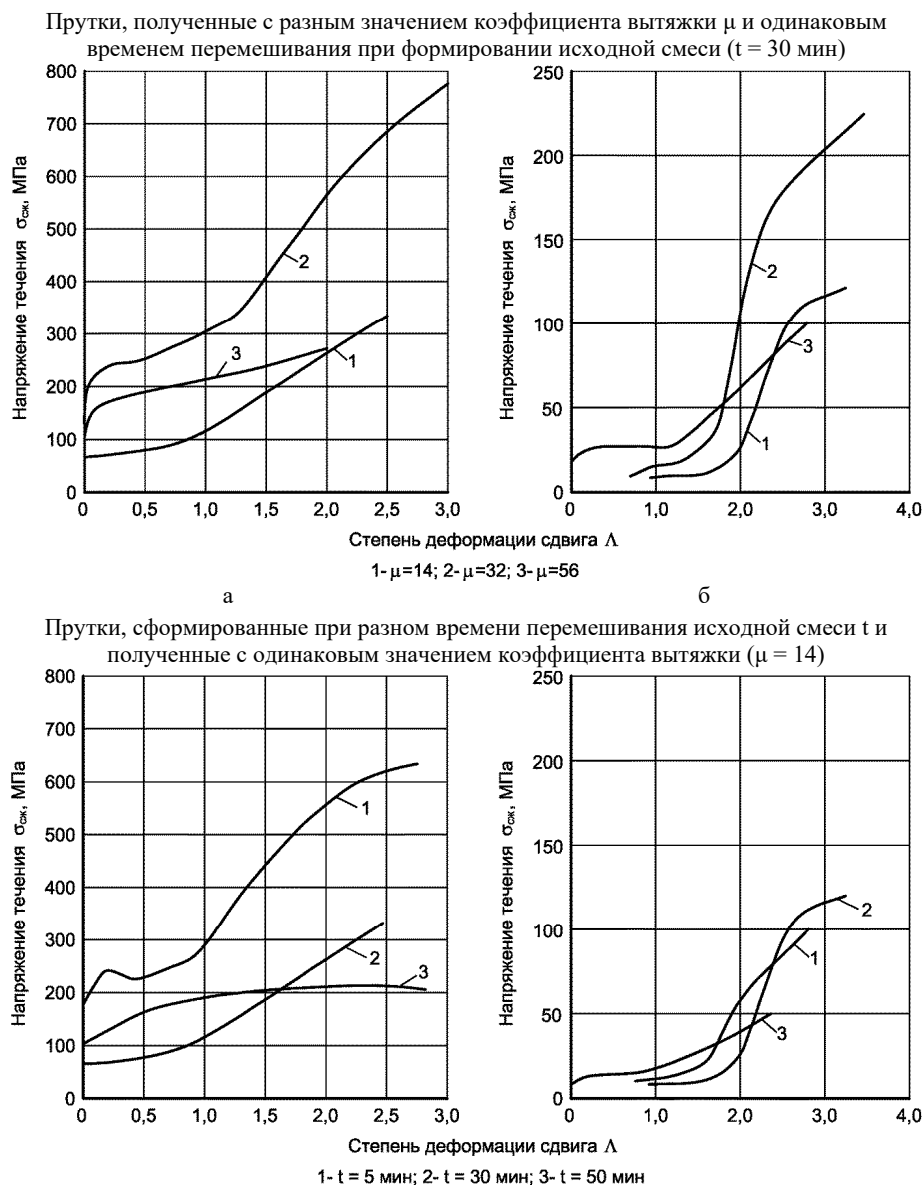


Рис. 7. Изменение прочностных характеристик образцов прутков до (а) и после (б) проведения процесса вспенивания

Fig. 7. Change of strength characteristics of bars before (a) and after (б) foaming process

позволило установить предельное количество вводимой в стружковую алюминиевую основу указанной добавки. Чтобы обеспечить устойчивое течение материала, состоящего из смеси стружки с порошком, при формировании горячехудрудированного прутка, содержание порошковой добавки не должно превышать 15 % по массе.

4. Стружковые отходы производства, отвечающие определенным требованиям по сортности и степени загрязненности, в ряде случаев можно использовать для получения высокопористого материала на основе алюминия. Для интенсификации процесса взаимного проник-

новения частиц порошка вещества-порофора в матричный сплав, способствующего лучшему протеканию процесса последующего вспенивания, прессовки рекомендуется подвергать дополнительной горячей экструзии с коэффициентом вытяжки, лежащем в интервале значений от 30 до 40. При соблюдении определенных условий предложенная технология позволит получать высокопористый алюминий с пористостью от 20 до 40 %, размерами пор от 1,0 до 3,0 мм и прочностью материала на сжатие от 20 до 40 МПа.

Список литературы

- [1] Кондратьева И.К. *Вторичные материальные ресурсы цветной металлургии*. М.: Металлургия, 1984. 151 с. [Kondratieva I.K. *Recyclable material resources of non-ferrous metallurgy*. M., Metallurgy, 1984. 151 p. (in Russian)]
- [2] Загиров Н.Н., Логинов Ю.Н. *Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих стружковых отходов меди и ее сплавов методами обработки давлением*: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 171 с. [Zagirov N.N., Loginov Yu.N. *Process basis of making materials and products from friable chip waste of copper and its alloys by forming*: a monograph. Krasnoyarsk, Sib. Feder. University Press, 2015. 171 p. (in Russian)]
- [3] Антонов М.М., Горбунов Ю.А., Жереб В.П. и др. Оценка модифицирующего воздействия порошковой смеси МС-М на структуру слитков и свойства экструдированных профилей из сплава АД31. *Сборник тезисов докладов VI международного конгресса «Цветные металлы и минералы – 2014»*, Красноярск, 2014, 406–408 [Antonov M.N., Gorbunov Yu.A., Zhereb V.P. Evaluation of modifying impact of powder mixture M-MS on ingots structure and properties of extruded profiles of alloy AD31. *Abstracts of the VI International Congress «Non-Ferrous Metals and Minerals – 2014»*, Krasnoyarsk, 2014, 406–408 (in Russian)]
- [4] Иванов И.А., Иванов Д.О., Аксенов А.А., Дуб А.В. Имитационная модель процесса пенообразования в алюминиевых расплавах. *Металлы*, 2005, 6, 60–65 [Ivanov I.A., Ivanov D.O., Aksenov A.A., Dub A.V. Simulation model of foaming process in aluminum melts. *Metals*, 2005, 6, 60–65 (in Russian)]
- [5] Щерба В.Н., Райтбарг Л.Х. *Технология прессования металлов*. М.: Металлургия, 1995. 336 с. [Scherba V.N. Raytbarg L.H. *Metal pressing technology*. M., Metallurgy, 1995. 336 p. (in Russian)]
- [6] Горохов Ю.В., Шеркунов В.Г., Довженко Н.Н. *Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов*: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 224 с. [Gorokhov Yu.V., Sherkunov V.G., Dovzhenko N.N. *Design basis of continuous metal pressing*: monograph. Krasnoyarsk, Sib. feder. University Press, 2015. 224 p. (in Russian)]
- [7] Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. *Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов*: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с. [Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagiriv N.N. *Compound and combined treatment of non-ferrous metals and alloys*: a monograph. M., MAKS Press, 2005, 344 p. (in Russian)]
- [8] Крушенко Г.Г., Шустров А.Ю. Модификатор для алюминиевых сплавов. *Изв. ВУЗов. Цветная металлургия*, 1983, 10, 20–22 [Krushenko G.G., Shustrov A.Yu. Modifier for aluminum alloys. *News of Higher Educational Institutions. Non-ferrous metallurgy*, 1983, 10, 20–22 (in Russian)]

[9] Горбунов Ю.А. Анализ областей применения и технологий производства пеноалюминия. *Сборник тезисов докладов IV международного конгресса «Цветные металлы»*, Красноярск, 2012, 834–832 [Gorbunov Yu.A. Analysis of application area and manufacturing of foam aluminum. *Abstracts of the IV International Congress «Non-Ferrous Metals»*, Krasnoyarsk, 2012, 834–842 (in Russian)]

[10] Загиров Н.Н., Ковалева А.А., Ольховик А.Я., Коваль О.Е. Технологическая оценка возможности получения высокопористого материала из стружковых отходов алюминиевого сплава АД31. *Вестник государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2015, 2, 59–64 [Zagirov N.N., Kovalev A.A., Olkhovik A.Ya., Koval O.E. Technological assessment of making highly porous material from friable chip waste of aluminum alloy AD31. *Bulletin of State Technical University named after G.I. Nosov*, 2015, 2, 59–64 (in Russian)]

[11] Иванов Д.О., Аксенов А.А., Иванов И.А. Исследование и моделирование пеноалюминия, полученного из вторичного алюминиевого сырья с использованием метода механического легирования. *Известия ВУЗов. Цветная металлургия*, 2007, 6, 56–61 [Ivanov D.O., Aksenov A.A., Ivanov I.A. Research and modeling of foam aluminum from recycled aluminum raw material by mechanical alloying. *News of Higher Educational Institutions. Non-ferrous metallurgy*, 2007, 6, 56–61 (in Russian)]