

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЯЧЕЙ ЭКСТРУЗИИ
АРМИРОВАННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЛИТЕЙНЫХ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

С.Г. Агбальян¹, А.А. Закарян², П.Л. Еремян¹, С.А. Оганесян¹

¹Национальный политехнический университет Армении

²ЗАО “Русал-Арменал”

При создании новых материалов с функциональными свойствами большой интерес представляют композиционные материалы на металлической основе, твердеющие дисперсными частицами (фазами) и упрочняющиеся дисперсными зёрнами, армированными металлическими волокнами. При этом размеры дисперсных частиц (фазы) варьируются от 0,01 до 0,1 мкм, объемное содержание составляет от 1 до 15 мас.%; размер дисперсного зёрна превышает 1,0 мкм, объемное содержание составляет ~25 мас.%, тогда как диаметр металлических волокон варьируется от одного до нескольких десятков и сотых микрометров, а объемное содержание составляет от нескольких процентов до 70 мас.% и более.

Изучено напряженное состояние горячей экструзии армированных высокопрочных литейных алюминиевых сплавов и исследованы особенности формирования их структуры и свойств. Показано, что все силы и напряжения изменяются во время процесса экструзии в зависимости от скорости и условий деформации на начальной и последующих стадиях процесса, физического состояния металла и изменения металлической поверхности металла от контакта контейнера. Установлены основные положения, определяющие характер деформации при горячей экструзии конической одноосной матрицы. Выявлено, что при прямом течении прессования структура неоднородная, а предел прочности увеличивается от центрального слоя к поверхности и от передней части до пресс-остатка. При небольших коэффициентах экструзии разница механических свойств между центральным и поверхностным слоями пресс-изделия возрастает, а при больших коэффициентах экструзии эта разница резко уменьшается и часто полностью исчезает, что обусловлено снижением интенсивности несоответствия механических свойств при больших коэффициентах экструзии металлов и сплавов.

Ключевые слова: алюминий, армирование, сплав, горячая экструзия, коэффициент вытяжки, деформация, структура, прочность.

Введение. Композиционные материалы на металлической основе, твердеющие дисперсными частицами (фазами) и упрочняющиеся дисперсными зёрнами, армированными металлическими волокнами, представляют большой интерес для создания новых материалов с высокой удельной прочностью,

жаропрочностью, пластичностью и другими ценными свойствами, при которых размер дисперсных частиц варьируется от 0,01 до 0,1 мкм, а объемное содержание составляет от 1 до 15 мас.%, тогда как размер дисперсных зерен превышает 1,0 мкм, а объемное содержание составляет ~25 мас.%. С точки зрения разнообразия свойств, более перспективны композиционные материалы, армированные металлическими волокнами, где диаметр металлических волокон варьируется от одного до нескольких десятков и сотых микрометров, а объемное содержание составляет от нескольких до 70 мас.% и более. Состав волокнистых композиционных материалов разнообразен и при использовании новых технологий может быть существенно расширен.

В последние годы композиционные сплавы на основе алюминия широко используются в различных областях промышленности. Они могут быть получены как с помощью технологии порошковой металлургии, так и по литейной технологии. Порошковая металлургическая технология не свободна от дефектов. Алюминиевый порошок достаточно окислен, что затрудняет металлический контакт с легирующими элементами и, как следствие, получение гомогенного сплава. Это, в свою очередь, затрудняет обеспечение необходимых механических свойств. С использованием технологий порошковой металлургии, за исключением горячей экструзии, невозможно создать абсолютно беспористую структуру. При температуре спекания может произойти взаимное растворение матрицы и волокон, что приведет к ухудшению свойств волокон. Кроме того, алюминиевый порошок стоит довольно дорого. При получении беспористой структуры методом литья указанные недостатки полностью устранены.

Цель исследования и обоснование методологии. Исходя из вышеизложенного, целью работы является исследование процесса горячей экструзии армированных высокопрочных литейных алюминиевых сплавов и изучение закономерностей формирования их структуры и свойств.

При исследовании процесса деформации используются экспериментальные и в некоторых случаях аналитические исследования. Эти методы позволяют определить взаимное перемещение элементарных частиц экструдированного металла, качественные и количественные зависимости, определяющие эти перемещения, и, следовательно, напряженно-деформированное состояние экструдированного металла [1-5].

Внешние силы, которые воздействуют на металл при прессовании с прямым истечением, и схема напряжения, генерируемая ими, показаны на рис. 1 [5].

Силы и напряжения (σ_m) пуансона, действующие на экструдированный металл, являются первичными активными, а силы и напряжения, влияющие на боковые и наклонные поверхности контейнера ($\sigma_{б.к}$, $\sigma_{п.к}$), а также силы трения, образуемые на контейнере и пуансоне ($T_{п}$, $T_{п.к}$, $T_{б.к}$, T_m), - вторичными

активными силами и напряжениями. Силы и напряжения экструдированного металла, влияющие на контейнер, являются реактивными силами. В процессе экструзии все эти силы и напряжения изменяются в зависимости от скорости и условий деформации на начальной и последующих стадиях процесса, физического состояния металла и изменения поверхности металла от контакта контейнера. Существенные изменения особенно видны на заключительной стадии процесса экструзии [1, 6, 7].

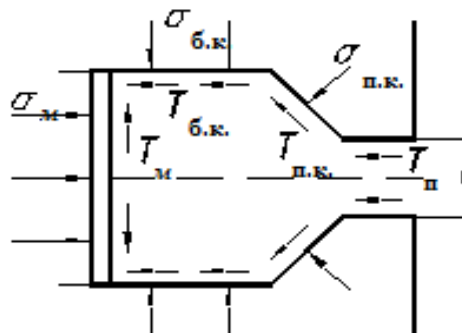


Рис 1. Воздействие внешних сил на металл при прямом прессовании и схема напряжения

В соответствии с условиями сил и деформации процесс выдавливания делится на три основных этапа (рис. 2) [1, 5]: 1) начальная стадия процесса, во время которой происходит осаждение брикета; 2) основная стадия процесса, характеризующаяся стабильным истечением металла; 3) конечная стадия процесса, на которой нарушается стабилизированное истечение металла, и процесс выдавливания заканчивается. Каждый из этапов характеризуется своими силовыми условиями, определяемыми в основном с помощью индикаторных диаграмм (полное давление экструзии – общий ход пуансона) [5].



Рис. 2. Изменение суммарного давления в пуансоне при разных стадиях (I, II, III) прессования с прямым истечением

Результаты исследования. Деформированное состояние экструдированного металла характеризовалось изменением координатной сетки соответственно в начале, середине и в конце процесса. Общая схема экструдированного металла с координатной сеткой и состояние деформации приведены на рис. 3.

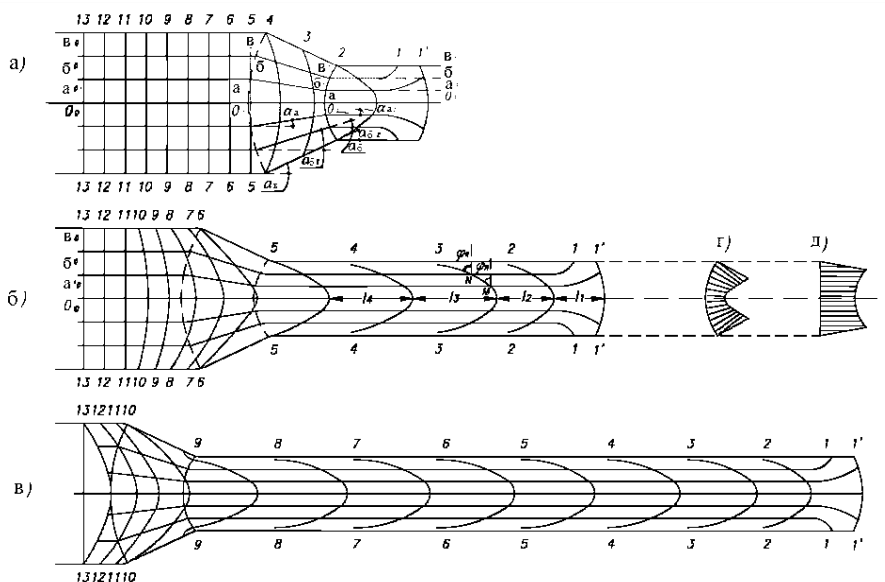


Рис. 3. Общая схема координатных сеток и деформированного состояния прессуемого металла: а - в начале течения, б - на основной стадии течения, в - на заключительной стадии течения, г - схема эпюры главных деформаций удлинения у выхода из обжимающей части пластической зоны, д - схема эпюры главных деформаций удлинения по диаметру (или поперечному сечению) пресс-изделия

Это позволяет определить следующие основные положения, выявляющие характер деформации при экструзии с прямым истечением с коническими матрицами:

1. Все прямые продольные линии начальной координатной сетки, оставаясь, за исключением переднего конца, практически прямыми после прессования, претерпевают изгибы у входа в обжимающую часть пластической зоны и у выхода из этой части.

2. Эти изгибы направлены во взаимно противоположные стороны (см. стрелки у углов α_{b1} и α_{b2} на рис. 3 а), что свидетельствует о немонотонности деформации.

3. Углы $\alpha_{b1} > \alpha_{a1}$ и $\alpha_{b2} > \alpha_{a2}$, что свидетельствует об уменьшении немонотонности деформации от периферии к центру.

4. Первые изгибы продольных линий происходят в точках прессования их с плоскостью входа (см. точки b_1, b_1, a_1), а вторые – в точках пересечения с плоскостью выхода из обжимающей части пластической зоны (см. точки 2, b_2, b_2, a_2). Это указывает на то, что торцевые поверхности обжимающей части пластической зоны представляют собой плавные осесимметричные поверхности, выпуклость которых направлена против движения прессуемого металла.

5. На некотором расстоянии от обжимающей части пластической зоны продольные линии сетки изгибаются по направлению к оси заготовки, образуя пережимы, утонения центральных и утолщения периферийных слоев. Утолщения являются аккумуляторами металла периферийных слоев, сдвигающихся относительно внутренних.

6. Все линии подготовки исходной координатной сетки были симметрично наклонены в направлении потока экструдированного металла. Это указывает на то, что внутренние слои экструдированного металла движутся быстрее, чем поверхностные слои.

7. В обычных условиях в экструдированном металле поперечные линии координатной сетки, за исключением соседних линий фронтальных частей заготовки, имеют параболический вид $Y^2 = 2px$. Параметры этой параболы зависят от расстояния кривых из передней части заготовки.

8. Поперечные линии, примыкающие к переднему концу пресс-изделия (в данном случае - одна), принимают форму ломаной линии $1 - 1' - 1' - 1$, которая показывает, что крайние точки этой ранее (до деформации) прямой линии перешли на боковую поверхность пресс-изделия и часть торцевой поверхности заготовки перешла на боковую поверхность прессования.

9. Стрела прогиба поперечных линий увеличивается в направлении, обратном движению металла (см. поперечные линии от 1 до 5 на рис. 3 б и от 1 до 9 на рис. 3 в).

10. Кроме роста стрел прогиба поперечных линий в направлении от переднего конца к заднему, в общем случае на большей части пресс-изделия наблюдается небольшой, иногда практически незаметный рост расстояний между вершинами этих линий, который иногда резко увеличивается к концу процесса.

11. Форма изгибов поперечных линий показывает, что все кольцевые слои пресс-изделия подвергаются, кроме основных деформаций (осевой и поперечной), деформации простого сдвига, которая растет от внутренних слоев к периферийным. Это подтверждается очевидным неравенством углов $\gamma_N > \gamma_M$, характеризующих величины сдвиговых деформаций в точках М и N поперечной линии 3 (рис. 3 б).

12. Рост деформации простого сдвига (параллельно оси прессования) от центра к периферии показывает, что и главные деформации удлинения, являющиеся результирующими основных и этих сдвиговых деформаций, увеличиваются от внутренних слоев к периферийным.

13. Направления главных деформаций удлинения у выхода из пластической зоны неодинаковы; они составляют некоторый угол с осью прессования, увеличивающийся также от оси к периферии.

14. Из рассмотренных схематических изменений координатной сетки следует, что главные радиальные и окружные деформации каждого элементарного объема являются деформациями укорочения.

Исходя из результатов исследования и условий уравнивания процесса горячей экструзии черных и цветных металлов, условия выдавливания в общем виде можно представить следующим образом:

$$dP \cdot \pi R_k^2 = 2\pi R_k^2 \cdot dL \cdot P_k \cdot f, \quad (1)$$

где P - давление прессования; R - внутренний радиус контейнера (заготовки); dL_k - текущая длина заготовки (рабочая высота емкости, вход в форму); P_6 - боковое давление; f - коэффициент трения контакта поверхности.

Примем, что

$$P_6 = \mu \cdot P, \quad \mu = \nu(1 - \nu), \quad (2)$$

где μ - коэффициент бокового давления, а ν - коэффициент материала Пуассона.

С учетом уравнения (2) представим уравнение (1) в виде

$$\frac{dP}{P} = 4f \cdot \frac{dL_k}{D_k} \cdot \nu(1 - \nu). \quad (3)$$

Решая (3), получим

$$P = P_{\text{кон. экс.}} \cdot e^{4f \cdot \frac{L_k}{D_k} \cdot \nu(1 - \nu)}, \quad (4)$$

где $P_{\text{кон. экс.}}$ - давление, когда $L_k=0$, т.е. давление в конце экструзии. В результате получим

$$P_{\text{кон. экс.}} = \sigma \cdot \ln \frac{F_k}{F_{\text{п.п}}}, \quad (5)$$

где σ - способность металла противостоять деформации при температуре экструзии с определенной скоростью; F_k и F_n – поперечная поверхность контейнера и пуансона.

Для производства армированных композиционных материалов был собран горячий экструдер с измерительным устройством, который смонтирован на гидравлическом полуавтоматическом прессе марки П474А с усилием 100×10^3 кг и скоростью рабочего хода $(3...4) \times 10^3$ м/с. Два основных узла экструдера: контейнера и пуансона, прикреплены соответственно к нижней (неподвижной) и верхней (подвижной) траверсам прессы. Трехслойный контейнер, изготовленный из теплостойкой стали марки 3Х2В8Ф ($HRC=52...54$), рассчитан на рабочее давление до 1500 МПа. Контейнер нагревается никелехромовым нагревателем. Для снижения тепловых потерь контейнер изолирован термостойкими подушками, что позволяет достичь температуры рабочей зоны до $400...450^\circ\text{C}$.

Процесс экструзии исследован при коэффициенте вытяжки $\lambda=4...8$. Условия вытяжки: диаметр контейнера - 25 мм, угол матрицы - $2\alpha=110^\circ$.

Структурными характеристиками полученных сплавов при горячей экструзии являются размер и форма зерен, а также степень структурной неоднородности.

Структура пресс-изделия характеризуется большой неоднородностью, основной причиной которой является неоднородная деформация. Причиной структурной неоднородности являются также изменения температурного режима, структурные изменения металла при экструзии и охлаждении [1, 8].

В целом, неоднородность в структуре пресс-изделия выражена в поперечном и продольном сечениях непропорционально размеру зерна. В зависимости от состояния деформации, размер зерна в пресс-изделии уменьшается от центра к наружной поверхности и от задней части до передней части. Эти различия в размере зерна в микроструктурах, изображенных на рис. 4 и 5, видны. Неоднородность размера зерна значительно увеличивается после термообработки, так как во время нагревания происходит интенсивная рекристаллизация в деформированных зонах с большой степенью деформации, что приводит к возникновению крупнозернистой структуры в наружном слое. Последний растет от передней части пресс-изделия до задней части (рис. 6). Появление такого слоя и характер его толщины еще раз доказывают структурную неоднородность [1, 9].

В случае экструзии смазкой крупнозернистый слой или вообще не появляется, или имеет небольшую толщину [1].

Условное выражение, характеризующее структуру пресс-изделия, обозначает средний размер зерна, который зависит от условий экструзии. При увеличении степени деформации средний размер зерна уменьшается, а при повышении температуры - увеличивается.

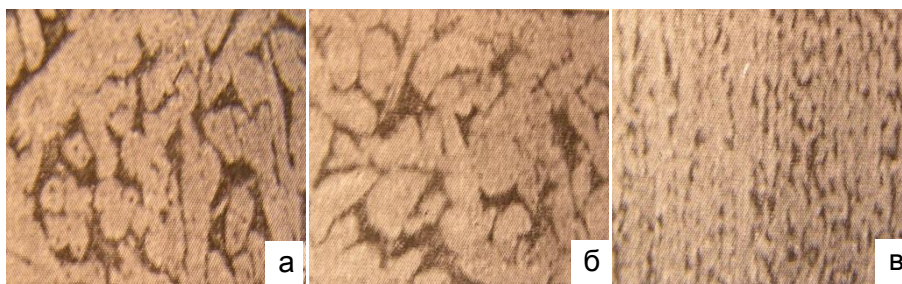


Рис. 4. Внутренняя структура дюралюминиевой проволоки (x100):
а - передняя часть, б - середина, в - задняя часть

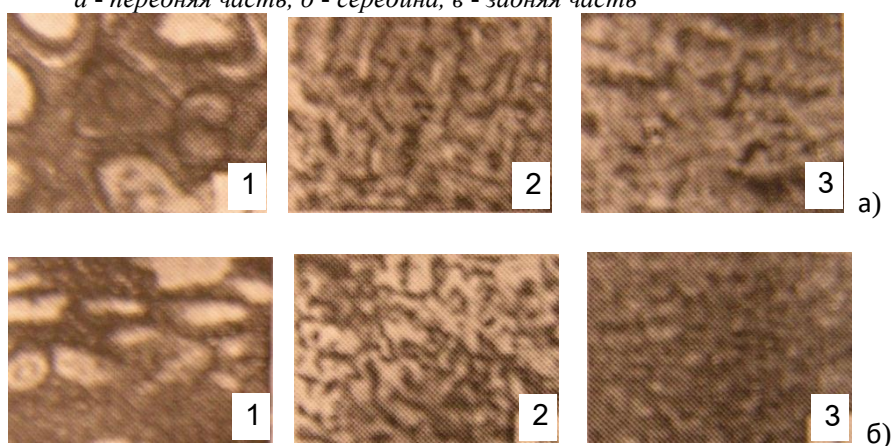


Рис. 5. Микроструктуры различных участков дюралюминиевой проволоки, экструдированной без смазки (x250): а - поверхность проволоки, б - центр проволоки;
1- передний конец, 2- промежуточная часть, 3 – пресс-остаток

Часто в пресс-изделии рассматривается расслоение параллельно оси. При наличии такой структуры поперечный разрыв разрушенного пресс-изделия имеет ступенчатую поверхность, что свидетельствует о наличии ослабленных поверхностей вдоль параллельной оси пресс-изделия.

Деформационная и структурная неоднородность в пресс-изделии влияет на его механические свойства. При прямом истечении прочность пресс-изделия увеличивается от центральных слоев к поверхности и от переднего конца к пресс-остатку. В некоторых случаях относительное удлинение такого рода изменяется в противоположном направлении.

При малых значениях коэффициента вытяжки разница механических свойств центрального и поверхностного слоев пресс-изделия возрастает. В случае больших коэффициентов вытяжки эта разница резко уменьшается и часто

полностью исчезает. Это связано с интенсивным уменьшением однородности механических свойств металлов и сплавов в случае экструзии с большим коэффициентом вытяжки. При $\lambda=10$ и более механические свойства во всех слоях пресс-изделий, за исключением небольшой части переднего края, практически одинаковы. На рис. 7 приведена взаимосвязь между пределом прочности в центральном и внутреннем краях пресс-изделий и коэффициентом вытяжки [1].

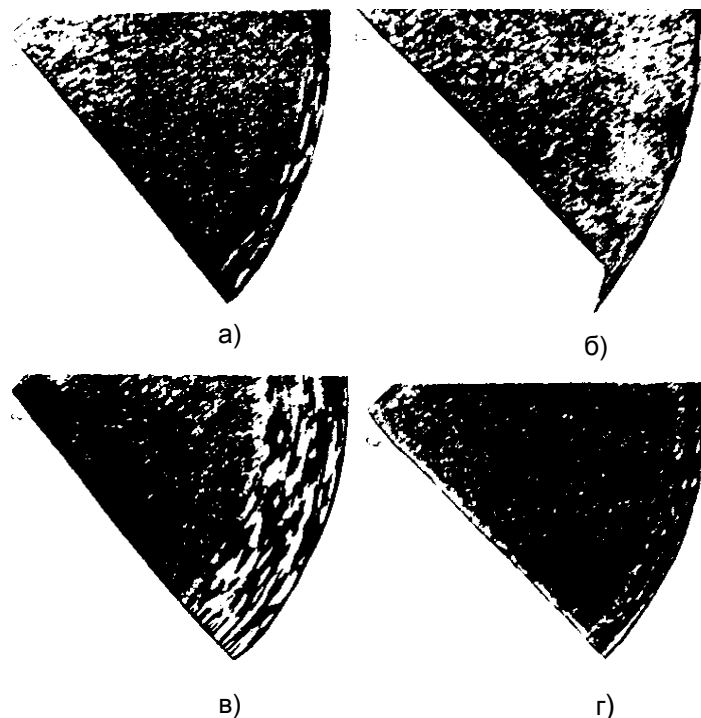


Рис. 6. Крупнозернистая микроструктура слоя, созданная во время прямого истечения пресс-изделия: а - передняя часть, б, в - промежуточная часть, г- пресс-остаток

Как видно из графика (рис. 7), в случае экструзии с прямым истечением прочность пресс-изделия увеличивается от центра к периферии и от переднего конца к пресс-остатку. В случае небольших коэффициентов вытяжки разница в механических свойствах в центральном и поверхностном слоях пресс-изделия увеличивается, а в случае больших коэффициентов эта разница резко уменьшается и часто полностью исчезает из-за интенсивного уменьшения неоднородности механических свойств в металлах и сплавах.

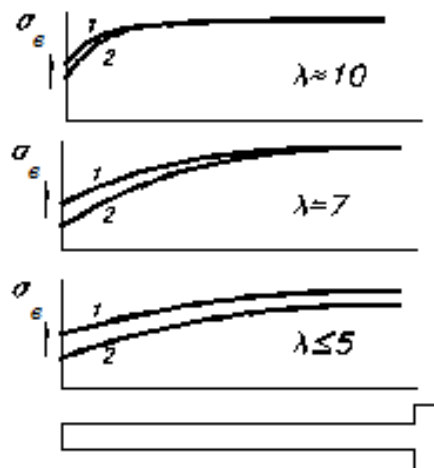


Рис. 7. Зависимость изменения предела прочности от коэффициента вытяжки на поверхности (1) и внутренних (2) слоях пресс-изделий

Заключение. Изучено напряженное состояние горячей экструзии армированных высокопрочных литейных алюминиевых сплавов и исследованы особенности формирования их структуры и свойств. Показано, что напряженное состояние армированных композиционных материалов на основе алюминия изменяется во время горячей экструзии в зависимости от скорости и условий деформации на начальной и последующих стадиях процесса, физического состояния металла и изменения металлической поверхности металла от контакта контейнера. Установлены основные положения, определяющие характер деформации при горячей экструзии конической одноосной матрицы. Выявлено, что при прямом течении прессования структура неоднородная, а предел прочности увеличивается от центрального слоя к поверхности и от передней части до пресс-остатка.

Литература

1. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. -М.: Металлургия, 1975.- 467с.
2. Петросян Г.Л. Пластическое деформирование порошковых материалов. -М.: Металлургия, 1988.- 153с.
3. Джонсон В., Кудо Х. Механика процесса выдавливания металла: Пер. с англ. -М.: Металлургия, 1965.- 174с.
4. Гун Г.Я., Полухин П.И., Полухин В.П., Прудовский Б.А. Пластическое формоизменение металлов.- М.: Металлургия, 1965.- 174с.

5. **Աղբալյան Ս.Գ.** Теоретические и технологические основы формирования структуры и свойств порошковых материалов при экструзии: Автореф. дис. ... докт. техн. наук.- Ереван, 1992.- 33с.
6. **Աղբալյան Ս.Գ., Ասլանյան Վ.Ժ., Տոսյան Մ.Ե.** Исследование получения полых изделий экструзией// Композиционные материалы и их обработка.- Ереван, 1985.- С.33-38.
7. Горячая экструзия титановой губки / **В.А. Павлов, В.В. Щербина, В.П. Токарев и др.** // Порошковая металлургия.- 1974.- N 9.- С.153-158.
8. **Радомыслевский И.Д., Щербан Н.И., Скальчук А.А.** О некоторых закономерностях экструзии из спеченных магниевых порошков // Порошковые конструкционные материалы.- Киев, 1980.- С.85-87.
9. **Աղբալյան Ս.Գ., Ասլանյան Վ.Ժ., Կուրյедով Վ.Ա.** Технология изготовления труб малого диаметра экструзией // Структура и свойства порошковых материалов.- Ереван, 1988. - С.24-28.

*Поступила в редакцию 05.12.2018.
Принята к опубликованию 30.05.2019.*

**ԲԱՐՁՐԱՄՈՒՐ ԱՄՐԱՆԱՎՈՐՎԱԾ ՁՈՒՎԱԾ ԱԼՅՈՒՄԻՆԱՅԻՆ
ՀԱՄԱՁՈՒՎԱԾՔՆԵՐԻ ՏԱՔ ԱՐՏԱՄՂՄԱՆ ԳՈՐԾՆՆԹԱՑԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ
ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՈՒ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՁԵՎԱՎՈՐՄԱՆ
ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ**

Ս.Գ. Աղբալյան, Ա.Հ. Զաքարյան, Փ.Լ. Երեմյան, Ս.Ա. Հովհաննիսյան

Ֆունկցիոնալ հատկություններով օժտված նոր նյութերի ստեղծման բնագավառում մեծ հետաքրքրություն են ներկայացնում դիսպերս մասնիկներով (ֆազերով) կարծրացող և դիսպերս հատիկներով ամրացվող ու մետաղական թելքերով ամրանավորված մետաղական հիմքով կոմպոզիտային նյութերը, որոնցում դիսպերս մասնիկների (ֆազերի) չափերը տատանվում են 0,01 մկմ-ից մինչև 0,1 մկմ, ծավալային պարունակությունը՝ 1-ից 15 ծավ. %, իսկ դիսպերս հատիկների չափերը գերազանցում են 1,0 մկմ, ծավալային պարունակությունը՝ ~25 ծավ. %-ը, մինչդեռ մետաղական թելքերի տրամագիծը տատանվում է մեկ մկմ-ի մասերից մինչև մի քանի տասնյակ և հարյուր մկմ, իսկ ծավալային պարունակությունը՝ մի քանի %-ից մինչև 70 ծավ. % և ավելի:

Ուսումնասիրվել է բարձրամուր ամրանավորված ձուլված ալյումինային համաձուլվածքների տաք արտամղման գործընթացի լարվածային վիճակը, և հետազոտվել են դրանց կառուցվածքի ու հատկությունների ձևավորման առանձնահատկությունները: Յուրյ է տրված, ու արտամղման ընթացքում բոլոր ուժերը և լարումները փոփոխվում են՝ կախված գործընթացի սկզբնական, ինչպես նաև հաջորդող փուլերում արագության և դեֆորմացման պայմաններից, մետաղի ֆիզիկական վիճակի և կոնտեյնների հետ մետաղի հպման մակերևույթի փոփոխություններից: Սահմանվել են միանցուղի կոնական մայրակով տաք արտամղման ժամանակ դեֆորմացիայի բնույթը բնորոշող հիմնական դրույթները: Յուրյ է տրված, որ ուղիղ արտահոսքով մամլման դեպքում մամլվածքի կառուցվածքն անհամասեռ է, իսկ ամրության սահմանն աճում է կենտրոնական շերտերից դեպի մակերևույթը և առջևի

ծայրից դեպի մամլամնացորդը: Արտամղման գործակցի ոչ մեծ արժեքների դեպքում մամլվածքի կենտրոնական և մակերևութային շերտերում մեխանիկական հատկությունների տարբերությունը մեծանում է, իսկ արտամղման մեծ գործակիցների դեպքում այդ տարբերությունը կտրուկ նվազում է և հաճախ իսպառ վերանում, որը պայմանավորված է մետաղներում և համաձուլվածքներում մեծ արտամղման գործակիցների դեպքում մեխանիկական հատկությունների անհամաչափության ինտենսիվության փոքրացմամբ:

Առանցքային բաւեր. ալյումին, ամրանավորում, համաձուլվածք, տաք արտամղում, արտամղման գործակից, դեֆորմացիա, կառուցվածք, ամրություն:

INVESTIGATING THE PROCESS OF HOT EXTRUSION OF REINFORCED HIGH-STRENGTH ALUMINUM CAST ALLOYS AND PECULIARITIES OF THEIR STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES

S.G. Aghbalyan, A.H. Zakaryan, P.L. Yeremyan, S.A. Hovhannisyan

At creating new materials with functional properties, metal-based composite materials, which are solid-proof and dispersed with grain particles (fixed) and reinforced with metal fibers are of great interest. At that, the dimensions of the disperse particles (phase) vary from 0.01 to 0.1 micrometres, the volumetric content is from 1 to 15 wt. %, and the size of the dispersed grain exceeds 1.0 mcm., the volumetric content is ~ 25 wt. %, whereas the diameter of the metal fibers varies from one to several tens and one hundred micrometers, and the volumetric content is from several to about 70 wt. % and more.

The tensile state of hot extraction of reinforced aluminum cast alloys are studied and the peculiarities of the structure formation and properties are studied.

It is shown that all the forces and voltages change during the process, depending on the speed and deformation conditions at the initial and subsequent stages of the process, the physical condition of the metal and the metal contact surface of the container.

The main standards that determine the nature of deformation at hot extrusion with one passage conical pipeline are established. It has been revealed that during direct compression, the structure is inhomogeneous, and the boundary of strength increases from the center to the surface and from the front to the press. In the case of not high extrusion coefficients, the difference of mechanical properties between the central and the surface layers of the press increases, but in the case of high extrusion coefficients, this difference sharply decreases and often totally disappears, which is conditioned by the reduction of intensities of the mechanical properties in the case of large extrusion factors in metals and alloys.

Keywords: aluminum, reinforcement, alloy, hot extraction, extraction coefficient, deformation, structure, strength.