

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ЗЕРЕННОЙ СТРУКТУРЫ СЛИТКОВ ИЗ СПЛАВА 6063 НА ИХ ПЛАСТИЧНОСТЬ, ПАРАМЕТРЫ ПРЕССОВАНИЯ И СВОЙСТВА ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ

© 2018 г. Р.С. Сырямкин, Ю.А. Горбунов, С.Б. Сидельников, А.Ю. Отмахова

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ООО «ЛПЗ «Сегал», г. Красноярск

*Статья поступила в редакцию 24.04.18 г., доработана 16.06.18 г., подписана в печать 22.06.18 г.*

В результате анализа научно-технической литературы и практических данных было установлено, что изменение параметров литья слитков при применении различных конструкций кристаллизаторов позволяет варьировать степень измельчения зеренной структуры слитков в достаточно широком диапазоне, что должно отражаться на условиях экструзии профилей из алюминиевых сплавов и их физико-механических характеристиках. Поэтому целью настоящей работы являлась оценка влияния степени измельчения зеренной структуры слитков сплава 6063 на деформационные и скоростные параметры прессования и механические свойства получаемых профилей. Для исследований было использовано несколько партий слитков диаметром 178 мм из сплава 6063, отлитых в промышленных условиях, а также профили, полученные методом прямого прессования на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 18 МН, подвергнутые закалке и старению. Оценка размера зерна в гомогенизированных слитках проводилась методом световой микроскопии на оптическом микроскопе Olimpus, а испытания механических свойств – на универсальной испытательной машине Inspect 20 кН-1. Установлено, что исходный размер зерна в структуре слитка оказывает значительное влияние как на пластичность заготовок при прессовании, так и на конечную структуру и механические свойства профильной продукции из алюминиевых сплавов. Анализируя полученные результаты, можно заключить, что повышение прочностных характеристик пресс-изделий из слитков с более измельченной структурой связано с тем, что в структуре металла после его деформации сохраняется мелкое зерно, а пластичность литого металла растет с увеличением степени измельчения зеренной структуры в слитке. В связи с этим повышаются эффективность закалки профильной продукции и скорость истечения металла при прессовании.

**Ключевые слова:** размер зерна, литье, экструзия, механические свойства, структура.

**Сырямкин Р.С.** – аспирант кафедры обработки металлов давлением (ОМД) Института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета (ИЦМиМ СФУ) (660025, г. Красноярск, пр-т Красноярский рабочий, 95). E-mail: roman.syryamkin@gmail.com.

**Горбунов Ю.А.** – зам. ген. директора по перспективному развитию ООО «ЛПЗ «Сегал» (660111, г. Красноярск, пр-т Пограничников, 103). E-mail: j.a.gorbunov@gmail.com.

**Сидельников С.Б.** – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой ОМД ИЦМиМ СФУ. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Отмахова А.Ю.** – магистрант кафедры ОМД ИЦМиМ СФУ. E-mail: A.Otmahova@sial-group.ru.

**Для цитирования:** Сырямкин Р.С., Горбунов Ю.А., Сидельников С.Б., Отмахова А.Ю. Исследование влияния степени измельчения зеренной структуры слитков из сплава 6063 на их пластичность, параметры прессования и свойства прессованных профилей. *Изв. вузов. Цвет. металлургия.* 2018. No. 6. С. 51–57.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-6-51-57.

*Syryamkin R.S., Gorbunov Yu.A., Sidelnikov S.B., Otmahova A.Yu.*

### **Study into the influence of the grain structure refinement degree of Alloy 6063 ingots on their plasticity, extrusion parameters and properties of extruded profiles**

The analysis of scientific and technical literature and practical data made it possible to found that changes in casting parameters for ingots using different mold designs allows varying the degree of ingot grain structure refinement in a sufficiently wide range, which should be reflected in the conditions of aluminum alloy profile extrusion as well as physical and mechanical properties of these profiles. Therefore, the purpose of the research was to assess the influence of the degree of grain structure refinement for Alloy 6063 ingots on extrusion deformation and speed parameters and mechanical properties of profiles produced. The study used several batches of Alloy 6063 ingots 178 mm in diameter cast under industrial conditions, as well as profiles obtained by direct extrusion on a 18 MN horizontal

hydraulic press subjected to quenching and aging. The grain size in homogenized ingots was estimated by light microscopy using the Olympus optical microscope, and mechanical properties tests were carried out using the Inspect 20 kN-1 universal test machine. It was found that the initial grain size in the ingot structure exerts a significant influence both on ingot plasticity during extrusion, and on the final structure and mechanical properties of profile products made of aluminum alloys. Having analyzed the results obtained, we can conclude that the increase in strength characteristics of products extruded from ingots with a more refined structure is due to the fact that fine grains are retained in the structure of metal after its deformation, and cast metal plasticity increases with the degree of grain structure refinement in the ingot. This leads to the higher efficiency of profile product hardening and metal outflow rate during extrusion.

**Keywords:** grain size, casting, extrusion, mechanical properties, structure.

**Syryamkin R.S.** – Postgraduate student, Metal forming department, Siberian Federal University (SibFU) (660025, Russia, Krasnoyarsk, Krasnoyarsk worker ave., 95). E-mail: roman.syryamkin@gmail.com.

**Gorbunov Yu.A.** – Deputy director general for prospective development «LPZ «Segal» Ltd. (660111, Russia, Krasnoyarsk, Pogranichnikov ave., 103). E-mail: j.a.gorbunov@gmail.com.

**Sidelnikov S.B.** – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Head of the Metal forming department, SibFU. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

**Otmahova A.Yu.** – Graduate student, Metal forming department, SibFU. E-mail: A.Otmahova@sial-group.ru.

**Citation:** Syryamkin R.S., Gorbunov Yu.A., Sidelnikov S.B., Otmahova A.Yu. Study into the influence of the grain structure refinement degree of Alloy 6063 ingots on their plasticity, extrusion parameters and properties of extruded profiles. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2018. No. 6. P. 51–57 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2018-6-51-57.

## Введение

В течение последних десятилетий во многих компаниях мира активно разрабатываются и осваиваются в производстве новые эффективные способы получения литых заготовок из алюминиевых сплавов. В числе инновационных технических решений в литейных производствах многих заводов нашли применение короткие кристаллизаторы для литья цилиндрических слитков, конструкции которых предусматривают либо установку графитовых колец с разовой смазкой, либо создание регулируемой газомасляной подушки, отделяющей алюминиевый расплав от графитовой стенки кристаллизатора [1, 2]. В обоих случаях охлаждение расплава в радиальном направлении за счет контакта с поверхностью кристаллизатора сводится к минимуму. Отвод тепла из зоны кристаллизации в большей степени происходит в осевом направлении за счет прямого контакта затвердевающей поверхности слитка с потоком воды, выходящей из отверстий, расположенных в нижней части кристаллизатора. При этом скорость охлаждения при кристаллизации расплава значительно повышается. Наряду с улучшением качества поверхности и структуры слитка это позволяет перейти к более высокой скорости литья и, соответственно, увеличению производительности процесса.

Как за рубежом, так и на отечественных заводах конструкции коротких кристаллизаторов с графитовыми кольцами наибольшее распространение получили в производстве слитков из сплавов группы 6XXX. Изменение параметров их литья при

применении этих конструкций кристаллизаторов (наряду с управлением расходом модифицирующей лигатуры Al–Ti–B) расширило возможности измельчения зеренной структуры слитков в достаточно широком диапазоне, что безусловно должно отражаться на условиях экструзии профилей из алюминиевых сплавов и их физико-механических характеристиках.

В классическом понимании теории обработки металлов давлением уменьшение размера зерна в исходной заготовке способствует повышению технологичности сплава [3, 4] и получению полуфабрикатов высокого качества. Однако в известных публикациях [5–17] эти вопросы рассматриваются не всегда так однозначно.

Так, в работе [5] отмечается, что при горячем формоизменении растяжением алюминия с исходным размером зерна 50 мкм деформация осуществляется преимущественно внутриверхним скольжением без существенной миграции границ, при этом рост зерна не происходит. В то же время в статье [6] установлен факт увеличения толщины зернограницных прослоек в слитках сплава 6061 при уменьшении размера зерна с обычных 250 мкм до 50 мкм и ухудшения механических свойств в прессованных изделиях вследствие развития собирательной рекристаллизации.

В связи с этим очевидна актуальность уточнения пределов измельчения размеров зерна в слитках, исходя из химического состава сплава и параметров предполагаемой деформационной

обработки слитков при производстве из них конкретной номенклатуры полуфабрикатов.

Целью настоящей работы являлась сравнительная оценка влияния степени измельчения зеренной структуры слитков из сплава 6063 (наиболее распространенного сплава группы 6XXX) в интервале  $d = 150 \div 70$  мкм (что эквивалентно диапазону от 4000 до 20 000 шт. зерен на  $1 \text{ см}^2$  сечения слитка) на их пластические характеристики, деформационно-скоростные параметры прессования и механические свойства получаемых профилей. Выбор диапазона значений  $d$  обусловлен тем, что в научно-технической литературе приводятся, как правило, данные по деформации слитков с размером зерен от 200 мкм и более, а также слитков с очень сильно измельченной структурой ( $d < 10 \div 20$  мкм).

## Материалы и методы

Для исследований было использовано несколько партий слитков диаметром 178 мм из сплава 6063, изготовленных на отечественных предприятиях. Химический состав образцов, отобранных для проведения работы, представлен в табл. 1.

Отливка слитков из сплава 6063 выполнялась в промышленных условиях с применением коротких кристаллизаторов с встроенными графитовыми кольцами. Гомогенизационный отжиг образцов осуществлялся в проходных печах гомогенизации при температурах 570—580 °С в течение 2—5 ч. Оценка размера зерна в гомогенизированных слитках выполнялась методом световой электронной микроскопии на оптическом микроскопе Olimpus. Пластические характеристики слитков определялись растяжением образцов при комнатной температуре.

Слитки прессовались прямым методом на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 18 МН с закалкой профилей на столе пресса воздушным потоком. Старение профилей осуществлялось при температуре 180 °С в течение 5 ч. Далее

проводились испытания механических свойств на универсальной испытательной машине Inspec 20 кН-1.

## Результаты и их обсуждение

Для проведения исследований были сформированы две партии слитков с различной степенью измельчения зерна в диапазоне  $d = 100 \div 120$  мкм (группа 1) и 70—90 мкм (группа 2). Для отливки образцов первой группы использовались кристаллизаторы с твердой смазкой, наносимой на поверхность графитовых колец до начала литья. Слитки второй группы были получены литьем сплава 6063 в кристаллизаторы, обеспечивающие создание газомасляной подушки между расплавом и графитовым кольцом. Типичная микроструктура полученных партий слитков сплава 6063 представлена на рис. 1.

Полученные данные показывают, что зеренная структура образцов во всех случаях неоднородна по сечению. На периферии слитков обеих групп размер зерна колеблется в диапазоне 55—85 мкм. На расстоянии  $1/2$  радиуса от центра для образцов первой группы величина  $d = 115 \div 155$  мкм, а второй — 80—110. Однако средние значения размера зерна по сечению составляют для первой партии  $d \sim 100 \div 120$  мкм, для второй — 70—90 мкм.

При исследовании структуры гомогенизированных слитков сплава 6063 в качестве основных показателей, влияющих на их пластические характеристики при прессовании, приняты размер Fe-содержащей  $\alpha$ -фазы, степень трансформации игольчатой фазы  $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$  в сфероидизированную  $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$  и коэффициент сферичности Fe-содержащих фаз после гомогенизации ( $FC$ ) [18]. Полученные параметры структуры слитков опытных партий представлены в табл. 2.

Как видно из приведенных данных, характеристики структуры слитков исследуемых групп несколько отличаются друг от друга. Так, диапа-

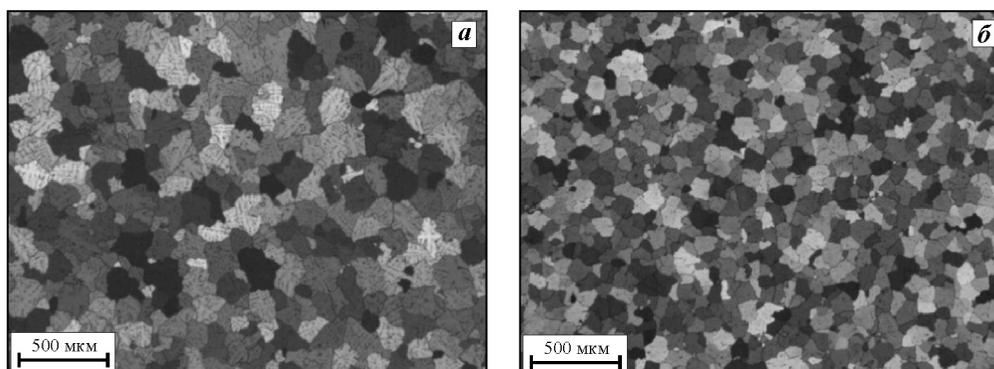
Таблица 1  
Химический состав промышленных партий слитков из сплава 6063

Сплав 6063	Концентрация элементов, мас. %							
	Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Ti	Cu	Zn
Фактический	0,48–0,52	0,46–0,50	0,16–0,26	0,01–0,03	0,01–0,03	0,01–0,02	0,01–0,05	0,01–0,05
DIN EN 573-3	0,45–0,9	0,20–0,6	0,35	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

Таблица 2

**Характеристики структуры гомогенизированных слитков из сплава 6063**

Группа обр.	$d$ , мкм	Размер фазы $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$ , мкм	Степень трансформации $\beta \rightarrow \alpha$ , %	$FC$
1	100–120	2,9–3,9	92,0–96,0	0,77–0,82
2	70–90	2,6–3,3	95,0–98,0	0,81–0,85



**Рис. 1.** Микроструктура литых слитков с различной степенью измельчения зерна  
*a* – группа 1 ( $d = 100\div 120$  мкм), *б* – группа 2 (70–90 мкм)

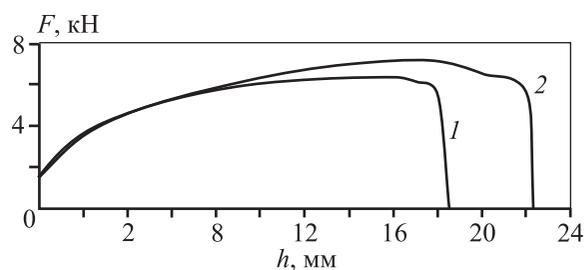
зон разброса размеров фазы  $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$  в образцах второй группы несколько меньше, чем в слитках первой группы. Вероятно, это связано с большей скоростью охлаждения расплава при кристаллизации слитков второй группы в кристаллизаторах с газомасляной подушкой. В итоге размер пластинчатой фазы  $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$  в литой структуре образцов должен быть меньше по сравнению со структурой слитков первой группы. Как следствие, в структуре гомогенизированных слитков наблюдается меньший размер фазы  $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$  и повышенное ее количество более округлой формы.

Очевидно, что суммарная протяженность поверхности границ зерен возрастает пропорционально уменьшению размера зерен. Поэтому при постоянном содержании примеси железа в сплаве объем измельченных Fe-содержащих фаз в слитках второй группы распределяется по большей поверхности, и их влияние на охрупчивание границ, соответственно, должно снизиться.

Для количественной оценки влияния параметров структуры (в рамках двух исследуемых групп слитков) на пластичность слитков проведено сопоставление данных по механическим свойствам, полученных в ходе испытаний на растяжение при комнатной температуре, с учетом приложенного к образцам усилия ( $F$ ) в процессе их удлинения ( $h$ ).

Полученные графики зависимости прочностных свойств металла слитков для разного уровня измельчения их зеренной структуры представлены на рис. 2. Видно, что слиток с более мелким зерном имеет лучшие пластические характеристики, о чем свидетельствует увеличение длины образца до момента его разрушения на ~22 %, что связано с более высокими коэффициентом трансформации фаз  $\beta \rightarrow \alpha$  и степенью сфероидизации.

Повышенные значения усилия, необходимого для совершения деформации образцов, изготовленных из слитков второй группы, могут быть объяснены большей протяженностью границ зерен вследствие их измельчения, что в соответствии с

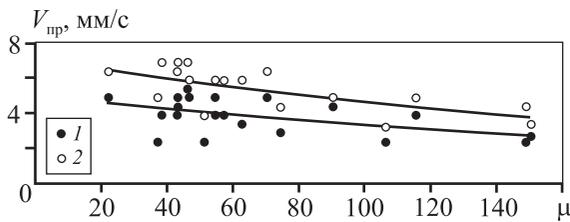


**Рис. 2.** Изменение прочностных свойств гомогенизированных слитков сплава 6063 с разной степенью измельчения структуры  
*1* и *2* – первая и вторая группы слитков

законом Петча—Холла ведет к увеличению прочности материала.

Данные по пластичности образцов, изготовленных из слитков второй группы, полученные при испытаниях на разрыв, подтверждаются фактическими сведениями по предельно допустимым скоростям прессования ( $V_{пр}$ ), зафиксированным при экструзии слитков на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 18 МН (рис. 3). В качестве предельно допустимых скоростей прессования для слитков обеих групп приняты значения, зафиксированные при появлении на поверхности профилей таких дефектов, как надирь.

Из данных рис. 3 наглядно видно, что более измельченная структура сплава 6063 (партия 2)



**Рис. 3.** Изменение предельно достигнутых скоростей прессования в зависимости от размера зерна в исходной заготовке и коэффициента вытяжки при прессовании

1 – группа 1 ( $d = 100 \div 120$  мкм), 2 – группа 2 (70–90 мкм)

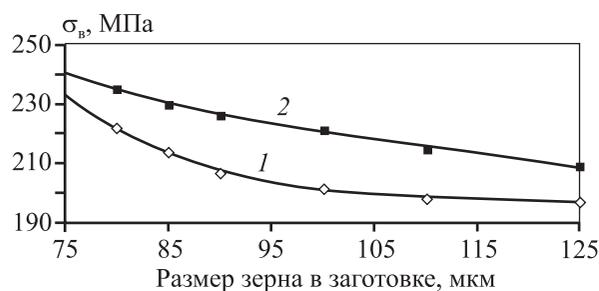
позволяет осуществлять его деформацию с более высокими (в среднем на 26 %) скоростями прессования, что подтверждает повышенную пластичность слитков этой группы по сравнению с первой, где образцы отличаются более крупными структурными составляющими. При этом значения скоростей истечения, достигнутые при прессовании профилей с коэффициентом вытяжки  $\mu > 120$ , не являются предельными для исследуемого структурного состояния материала. Это связано с тем, что конструктивное исполнение выходной линии пресса, использованного при проведении работы, не позволило осуществить экструзию со скоростями истечения выше 35 м/мин и достигнуть максимальной производительности головного оборудования.

Результаты металлографического анализа зеренной структуры профилей, полученных из слитков обеих групп, представлены в табл. 3. Полученные данные показывают сохранение наследственного влияния исходной структуры слитков во всех исследуемых диапазонах коэффициента вытяжки. В структуре металла второй группы после его деформирования сохраняется более мелкое зерно, чем в профилях, отпрессованных из слитков первой группы. При этом с увеличением коэффициента вытяжки при прессовании профилей в их структуре наблюдается рост доли поверхност-

Таблица 3

**Размер зерна (доля ККО) в структуре профилей из сплава 6063 в поляризованном свете при увеличении  $50\times$**

Группа слитков	$\mu = 30 \div 60$	$\mu = 61 \div 100$	$\mu = 101 \div 130$
1	 86 мкм (25 %)	 86,5 мкм (28 %)	 99 мкм (30 %)
2	 69 мкм (12 %)	 77 мкм (24 %)	 85 мкм (27 %)



**Рис. 4.** Изменение временного сопротивления разрыву металла профилей в зависимости от размера зерна в слитке и коэффициента вытяжки

1 —  $\mu = 90$ , 2 —  $\mu = 60$

ного крупнокристаллического ободка (ККО), что связано с развитием собирательной рекристаллизации [19, 20]. Интенсивность этого процесса на профильной продукции возрастает при переходе от малых значений коэффициента вытяжки к большим.

Однако общий размер зерна и доля ККО несколько ниже на профилях, полученных из слитков второй группы, что предположительно должно обеспечить более высокие механические свойства по сравнению с полуфабрикатами из слитков первой группы.

Для подтверждения этого были проведено изучение механических свойств профилей, полученных с разной степенью вытяжки из слитков с разным измельчением зеренной структуры. При этом с целью прослеживания закономерности объем выборки слитков по сравнению с исходным этапом работы был увеличен за счет результатов исследований дополнительных партий с промежуточными значениями размера зерна (рис. 4).

Полученные результаты механических испытаний на разрыв подтвердили предположение о том, что изначальная структура заготовок оказывает влияние не только на их поведение при деформации, но и на конечные свойства полуфабрикатов, получаемых из них. Установлено, что при значениях коэффициента вытяжки при прессовании, равных 60 и 90, предел прочности профилей из сплава 6063 повышается на 20—25 МПа с уменьшением размера зерна в слитках со 125 до 75 мкм.

## Заключение

Полученные в работе результаты позволяют заключить, что изменение условий литья слитков из сплава 6063, размера зерна в структуре литых за-

готовок в диапазоне 120—70 мкм и сопутствующие изменения размеров и морфологии Fe-содержащих фаз оказывают свое влияние как на поведение этих заготовок при прессовании, так и на качество получаемых полуфабрикатов, а именно:

— пластичность литого металла с уменьшением размера зерна в слитках возрастает, способствуя достижению более высоких значений предельно допустимых скоростей истечения при прессовании профилей;

— наследственное влияние измельченной структуры слитков сохраняется в конечной продукции, обеспечивая повышение прочностных свойства профилей с уменьшением размера зерна в заготовке в исследованном диапазоне на 20—25 МПа.

Таким образом, использование в промышленном производстве деформированных полуфабрикатов слитков из сплава 6063 с различной степенью измельчения зерна может не только существенно влиять на производительность головного оборудования, но и оказывать достаточно заметное влияние на состояние структуры, механические и, возможно, эксплуатационные свойства конечных изделий. В связи с этим представляется целесообразным проведение более детальных исследований по уточнению реологических характеристик заготовок из сплавов группы 6XXX, получаемых с применением современных систем литья, параметров их термомеханической обработки и конечных свойств получаемых полуфабрикатов.

## Литература/References

1. Макаров Г.С. Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования. Основы производства. М.: Интермет Инжиниринг, 2011.  
*Makarov G.S.* Ingots from aluminum alloys with magnesium and silicon for pressing. Basics of production. Moscow: Intermet Engineering, 2011 (In Russ.).
2. Саха П.К. Технология прессования алюминия. Пер. с англ. М.: НП «АПРАЛ», 2015.  
*Saha P.K.* Aluminum extrusion technology. Moscow: APRAL, 2015 (In Russ.).
3. Грищенко Н.А., Сидельников С.Б., Губанов И.Ю., Лопатина Е.С., Галиев Р.И. Механические свойства алюминиевых сплавов. Красноярск: СФУ, 2012.  
*Grishchenko N.A., Sidelnikov S.B., Gubanov I.Yu., Lopatina E.S., Galiev R.I.* Mechanical properties of aluminum alloys. Krasnoyarsk: SibFU, 2012 (In Russ.).
4. Yu Z.H., Zhang D.T., Zhang W., Qiu C. Deformation behavior and microstructure evolution of 6063 alloy during

- hot compression. *Mater. Sci. Forum.* 2018. Vol. 913. P. 63—68.
5. *Кайбышев О.А., Валиев Р.З.* Границы зерен и свойства металлов. М.: Metallurgiya, 1987.  
*Kaibyshev O.A., Valiev R.Z.* Boundaries of grains and the properties of metals. Moscow: Metallurgiya, 1987 (In Russ.).
  6. *Овсянников Б.В.* Осторожно — модифицирование зерна. *Технол. легких сплавов.* 2015. No. 2. С. 40—45.  
*Ovsyannikov B.V.* Careful — grain modification. *Tekhnologiya legkikh splavov.* 2015. No. 2. P. 40—45 (In Russ.).
  7. *Donik C.* Influence of artificial aging on the electrochemical properties of the aluminium AA 6063 alloy. *Mater. Tehnol.* 2018. Vol. 52(1). P. 71—75.
  8. *Khelif M., Aydi L., Nouri H., Bradai C.* High strain-rate tensile behaviour of aluminium A6063. In: *Proc. 7-th Conf. on Design and Modeling of Mechanical Systems (CMSM'2017)* (March 27—29, Hammamet, Tunisia). *Lecture Notes Mech. Eng.*, 2018. P. 865—870.
  9. *Kubásek J., Vojtěch D., Dvorský D.* Structure and mechanical properties of aluminium alloy sampled from a firefighter ladder. *Manufact. Technol.* 2017. Vol. 17(6). P. 876—881.
  10. *Abioye O.P., Abioye A.A., Atanda P.O., Osinkolu G.A., Folayan A.J.* Numerical simulation of outer die angle of equal channel angular extrusion process. *Int. J. Mech. Eng. Technol.* 2017. Vol. 8(12). P. 264—273.
  11. *Wang Y., Zhao S., Zhao X.* Microstructure of semi-solid 6063 alloy fabricated by radial forging combined with unidirectional compression recrystallization and partial melting process. *MATEC Web of Conferences.* 2017. No. 136. 01003.
  12. *Wang Y.Q., Yuan H.X., Chang T., Du X.X., Yu M.* Compressive buckling strength of extruded aluminium alloy I-section columns with fixed-pinned end conditions. *Thin-Walled Structures.* 2017. Vol. 119. P. 396—403.
  13. *Wang Y., Zhao S., Zhang C.* Microstructural evolution of semisolid 6063 aluminum alloy prepared by recrystallization and partial melting process. *J. Mater. Eng. Performa.* 2017. Vol. 26(9). P. 4354—4363.
  14. *Li S.-K., Li L.-X., Liu Z.-W., Wang G.* Effect of extrusion speed on weld strength of 6063 square tube. *Zhongguo Youse Jinshu Xuebao. Chin. J. Nonferr. Met.* 2017. Vol. 27(9). P. 1775—1784.
  15. *Liu Z.-W., Li L.-X., Yi J., Li S.-K., Wang Z.-H., Wang G.* Influence of heat treatment conditions on bending characteristics of 6063 aluminum alloy sheets. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China* (Eng. Ed.). 2017. Vol. 27(7). P. 1498—1506.
  16. *Imam M., Racherla V., Biswas K., Fujii H., Chintapenta V., Sun Y., Morisada Y.* Microstructure-property relation and evolution in friction stir welding of naturally aged 6063 aluminium alloy. *Int. J. Adv. Manufact. Technol.* 2017. Vol. 91(5-8). P. 1753—1769.
  17. *Muhammad W., Brahme A.P., Kang J., Mishra R.K., Inal K.* Experimental and numerical investigation of texture evolution and the effects of intragranular backstresses in aluminium alloys subjected to large strain cyclic deformation. *Int. J. Plastic.* 2017. Vol. 93. P. 137—163.
  18. *Al-Marahleh G.* Effect of heat treatment parameters on distribution and volume fraction of Mg<sub>2</sub>Si in the structural Al 6063 alloy. *Amer. J. Appl. Sci.* 2006. Vol. 3 (5). P. 1819—1823.
  19. *Брянцев П.Ю.* Исследование и оптимизация режимов термической обработки слитков сплавов системы Al—Mg—Si: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСиС, 2007.  
*Bryantsev P.Y.* Research and optimization of modes of thermal processing of ingots of alloys of system Al—Mg—Si: Abstr. diss. of PhD. Moscow: MISIS, 2007 (In Russ.).
  20. *Горелук С.С.* Рекристаллизация металлов и сплавов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgiya, 1978.  
*Gorelik S.S.* Recrystallization of metals and alloys. 2-nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1978 (In Russ.).
  21. *Bandini C., Reggiani B., Donati L., Tomesani L.* Development and validation of a dynamic and static recrystallization model for microstructural prediction of AA6060 aluminum alloy with qform. In: *Proc. Conf. Eleventh International Aluminum Extrusion Technology Seminar.* Madison: Omnipress, 2016. Vol. 1. P. 789—800.