

УДК 621.74:621.77.014:621.777

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

Р.С. Сырямкин¹, Ю.А. Горбунов², С.Б.Сидельников¹, А.Ю. Отмахова¹

¹Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

²ООО «ЛПЗ «Сегал», г. Красноярск, Россия

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 исследований 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, подвергнутых закалке и старению. Оценка размера зерна в гомогенизированных слитках выполнялась методом световой микроскопии на оптическом микроскопе Olympus а испытания механических свойств проводились 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 увеличивается с увеличением степени измельчения зеренной структуры в слитке. По результатам проведенных исследований можно также утверждать, что в связи с этим повышаются эффективность закалки профильной продукции и скорости истечения металла при прессовании.

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

Сырямкин Р.С. – аспирант кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ) (660025, г. Красноярск, просп. Красноярский рабочий, 95). E-mail: roman.syryamkin@gmail.com.

Горбунов Ю.А. – заместитель генерального директора по перспективному развитию ООО «ЛПЗ «Сегал» (660111, г. Красноярск, пр. Пограничников, 103). Тел.: +7 (391)274-90-70. E-mail: j.a.gorbunov@gmail.com.

Сидельников С.Б. – докт. техн. наук, проф., заведующий кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВО СФУ (660025, г. Красноярск, просп. Красноярский рабочий, 95). E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Отмахова А.Ю. – магистрант кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВО СФУ (660025, г. Красноярск, просп. Красноярский рабочий, 95). Тел.: (391) 206-37-31. E-mail: A.Otmahova@sial-group.ru.

Syryamkin R.S., Gorbunov Y.A., Sidelnikov S.B., Otmahova A.Y.

Investigation of the influence of the degree of grinding of the ingot grain structure of the 6063 alloy on its plasticity, extruding parameters and properties of extruded profiles

As a result of the analysis of scientific and technical literature and practical data, it was found that the change in casting parameters for ingots using different designs of crystallizers makes it possible to vary the degree of refinement of the grain structure of ingots in a sufficiently wide range, which should be reflected in the conditions of extrusion of aluminum alloy profiles and their physico-mechanical characteristics. Therefore, the purpose of the research was to assess the influence of the degree of grinding of the grain structure of ingots of alloy 6063 on deformation and speed parameters of extruding and the mechanical properties of the obtained profiles. For the research, several batches of 178 mm diameter ingots of 6063 alloy cast under industrial conditions were used, as well as profiles obtained by direct extruding on a

horizontal hydraulic press with a force of 18 MN subjected to quenching and aging. The grain size in homogenized ingots was estimated by light microscopy using an Olympus optical microscope, and mechanical properties tests were carried out using the universal test machine Inspect 20 kN-1. It is established that the initial grain size in the ingot structure exerts a significant influence both on the plasticity of the ingots during extruding, and on the final structure and mechanical properties of the profile products from aluminum alloys. Analyzing the obtained results, we can conclude that the increase in the strength characteristics of extruded products from ingots with a more crushed structure is due to the fact that in the structure of the metal after its deformation the fine grain is retained, and the plasticity of the cast metal increases with the degree of grinding of the grain structure in the ingot. Based on the results of the conducted studies, it can also be asserted that, in connection with this, the efficiency of hardening of the profile products and the rate of metal outflow during extrusion.

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

Syryamkin R. S. – postgraduate student of Metal Forming Department, School of Non-Ferrous Metals and Material Science SFU (660025, Russia, Krasnoyarsk, ave. Imeni gazeti Krasnoyarskiy rabochiy, 95). E-mail: roman.syryamkin@gmail.com.

Gorbunov Y. A. – Deputy Director General for Prospective Development «LPZ «Segal» Ltd. (660111, Russia, Krasnoyarsk, ave. Pogranichnikov, 103). Phone.: +7 (391)274-90-70. E-mail: j.a.gorbunov@gmail.com.

Sidelnikov S.B. – Dr. Sci. (Eng.), professor, Head of Metal Forming Department of School of Non-Ferrous Metals and Material Science SFU (660025, Russia, Krasnoyarsk, ave. Imeni gazeti Krasnoyarskiy rabochiy, 95). Phone.: +7 (391) 206-37-31. E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Otmahova A. Y. – graduate student of Metal Forming Department, School of Non-Ferrous Metals and Material Science SFU (660025, Russia, Krasnoyarsk, ave. Imeni gazeti Krasnoyarskiy rabochiy, 95). E-mail: A.Otmahova@sial-group.ru.

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 кристаллизаторы для литья цилиндрических слитков, конструкции которых предусматривают создание регулируемой газомасляной подушки, разделяющей алюминиевый расплав и стенки кристаллизатора. Она практически отжимает затвердевающий металл от поверхности кристаллизатора. В результате охлаждение за счет контакта между поверхностью кристаллизатора и затвердевающего сплава сведено к минимуму. Кристаллизация металла в лунке происходит за счет прямого контакта затвердевающей поверхности слитка с потоком воды, выходящей из отверстий, расположенных в нижней части кристаллизатора. При этом скорость охлаждения значительно повышается, что наряду с повышением качества поверхности и структуры слитка ведет к гораздо более высокой скорости литья.

Наибольшее распространение в производстве слитков из сплавов группы 6XXX к настоящему времени как за рубежом, так и на отечественных заводах получили кристаллизаторы типов «Air Slip» (разработчик компания «Wagstaff», USA [1]), «Air Soil Veil» (компания «VAW», Germany [2]), «Hycast» (компания «Hydro Aluminium», Norway [3]),

отличающиеся друг от друга конструктивным исполнением узла формирования газомасляной подушки. Изменение параметров литья слитков при применении этих конструкций кристаллизаторов позволяет варьировать степень измельчения зеренной структуры слитков в достаточно широком диапазоне, что, безусловно, должно отражаться на условиях экструзии профилей из алюминиевых сплавов и их физико-механических характеристиках. Однако в имеющихся публикациях [4-22] эти вопросы практически не рассматриваются.

В классическом понимании теории обработки металлов давлением уменьшение размера зерна в исходной заготовке способствует повышению технологичности сплава. Можно предположить, что улучшение технологичности слитков при прессовании связано с ослаблением отрицательного влияния железосодержащих фаз, скорость превращения которых в благоприятную $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$, фазу увеличивается, с измельчением зерна в зеренной структуре. Величина поверхности границ зерен увеличивается прямо пропорционально уменьшению размера зерен. Поэтому при одном и том же содержании примеси железа в сплаве тот же объем железосодержащих фаз будет распределен по большей поверхности и их влияние на охрупчивание границ, соответственно, снижается.

Таким образом, целью настоящей работы является оценка влияния степени измельчения зеренной структуры слитков сплава 6063 на их

пластические характеристики, деформационные и скоростные параметры прессования и механические свойства получаемых профилей.

Материалы и методы

Для исследований было использовано несколько партий слитков диаметром 178 мм из сплава 6063, отлитых в промышленных условиях. Оценка размера зерна в гомогенизированных слитках выполнялась методом световой микроскопии на оптическом микроскопе Olimpus. Пластические характеристики слитков оценивались при комнатной температуре. Химический состав слитков, используемых при проведении исследований, представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав сплава 6063

Концентрация элементов, мас %							
Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Ti	Cu	Zn
0,48-0,52	0,46-0,50	0,35	0,10	0,05	0,05	0,08	0,05

Прессование слитков проводилось прямым методом на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 18 МН с закалкой профилей на столе прессы. Старение профилей осуществлялось по стандартному режиму для сплава 6063, с дальнейшими испытаниями механических свойств на универсальной испытательной машине Inspect 20 кН-1.

Результаты и их обсуждение

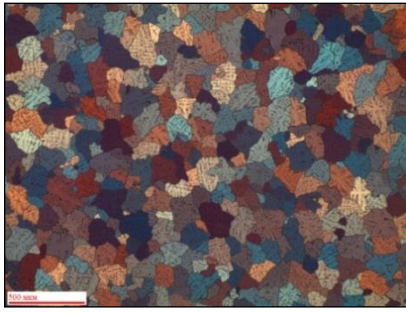
Для проведения исследований были выбраны слитки с измельчением зеренной структуры в диапазоне 76-86 мкм (группа 1) и 100-120 мкм (группа 2). Выбор данного диапазона обусловлен тем, что в научно-технической литературе приводятся данные только по оценке реологических характеристик слитков с более крупным зерном (150-200 мкм) и слитков с очень сильно измельченной структурой (уровень 10-20 мкм). Результаты исследования приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики структуры гомогенизированных слитков из сплава 6063

Группа слитков	Показатели	
	Размер зерна, мкм	Степень превращения $\beta - \alpha$, %
1	100-120	89,0-96,4
2	76-86	92,8-99,1

Как видно из приведенных данных характеристики слитков при одинаковой термической обработке сильно отличаются по степени превращения фазы $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$ в $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$. Чем выше степень превращения фазы $\beta(\text{Al}_5\text{FeSi})$ в $\alpha(\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si})$, тем большей пластичностью характеризуются свойства исследуемого сплава. Микроструктура полученных слитков сплава 6063 представлена на рис. 1.

Для оценки влияния размера зерна на пластичность слитков проводили сопоставление данных по механическим свойствам, полученных при испытаниях на растяжение, при этом определяли временное сопротивление разрыву (σ_B) и относительное удлинение (δ).



a



б

Рис.1. Микроструктура гомогенизированных слитков с различной степенью измельчения: *a* – группа 1; *б* – группа 2

Полученные зависимости свойств металла слитков для разного уровня измельчения их зеренной структуры представлены на рис. 2, из которых видно, что чем меньше размер зерна, тем выше пластические характеристики металла, о чем свидетельствует увеличение удлинения образцов до их разрушения.

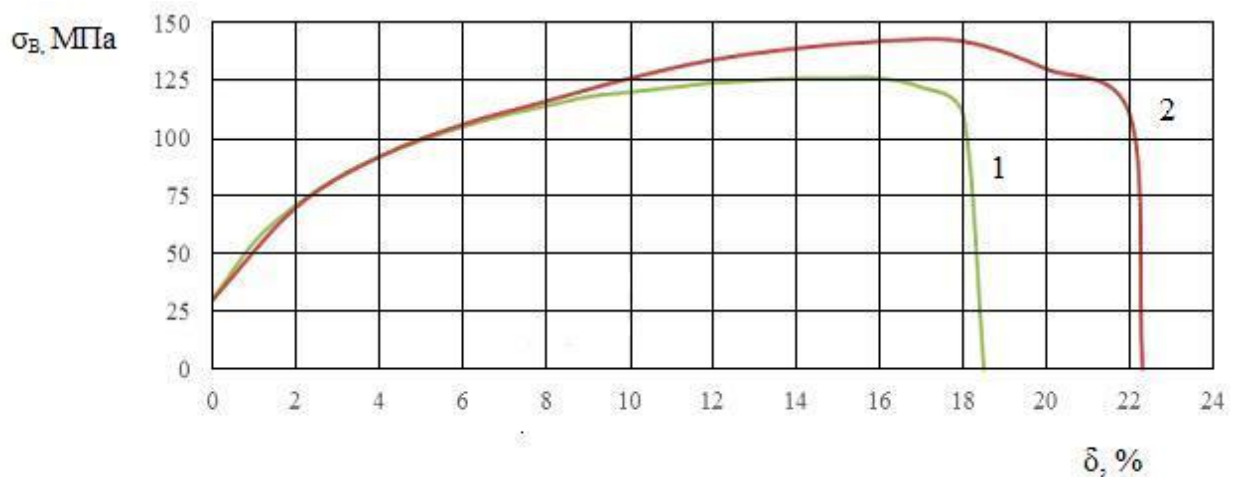


Рис. 2. Изменение свойств гомогенизированных слитков сплава 6063 с разной степенью измельчения структуры: 1 – размер зерна 100 мкм; 2 – размер зерна 80 мкм

Полученные при испытаниях на разрыв данные по удлинению образцов подтверждаются фактическими данными, полученными при экструзии слитков на горизонтальном гидравлическом прессе усилием 18 МН (рис. 3).

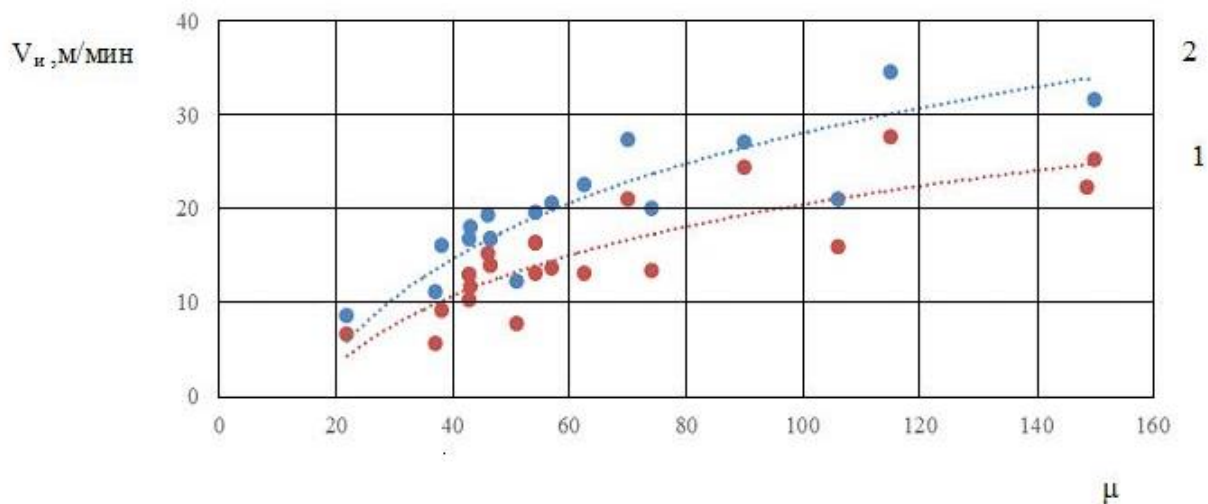


Рис. 3. Изменение скоростей истечения (V_n) в зависимости от размера зерна в исходной заготовке и вытяжки при прессовании (μ): 1 – размер зерна 100 мкм; 2 – размер зерна 80 мкм

Так как измельчение зеренной структуры в слитке сделало ее более восприимчивой к гомогенизации, при закалке на столе пресса фиксация твердого раствора должна происходить более интенсивно. Для подтверждения этого были проведено изучение механических свойств профилей, полученных в разных диапазонах вытяжки из слитков с разным измельчением зеренной структуры (рис. 4).

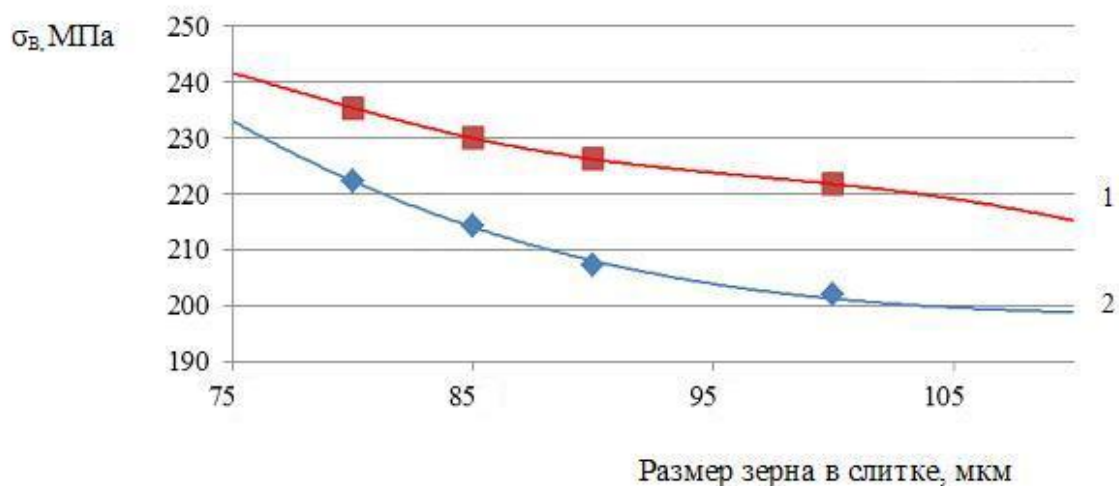
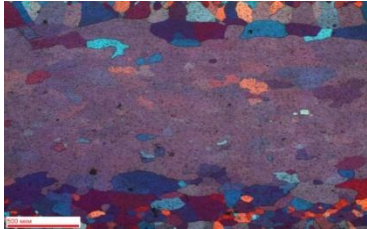
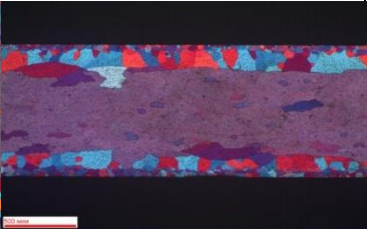
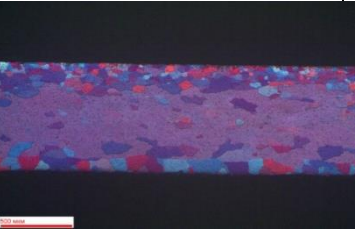
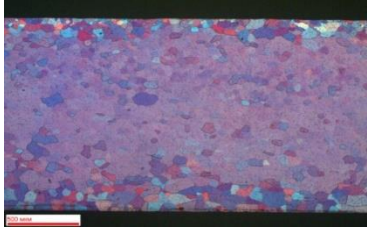
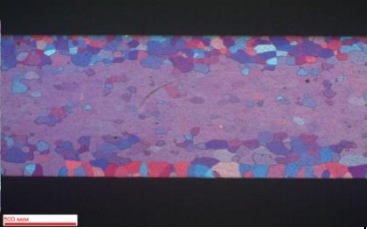
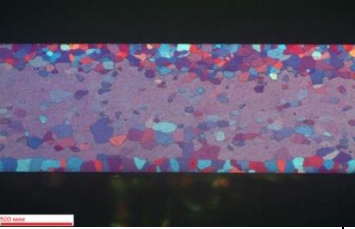


Рис. 4. Изменение временного сопротивления разрыву металла профилей в зависимости от размера зерна в слитке и вытяжки: 1 – $\mu = 90$; 2 – $\mu = 60$

Зависимости, представленные на рис. 4, показывают, что с уменьшением размера зерна в заготовке наблюдается повышение прочностных характеристик металла пресованных профилей. Для анализа полученных данных по прочностным характеристикам были проведены металлографические исследования зеренной структуры профилей, результаты которых представлены в табл. 3.

Результаты наследственного влияния зеренной структуры слитков на структуру пресс-изделий, представленные в табл. 3, прослеживаются во всех исследуемых диапазонах вытяжек.

Таблица 3 - Размер зерна и доля ККО в структуре профилей из сплава 6063 в поляризованном свете при увеличении x50

Размер зерна в слитке, мкм	Вытяжка		
	30-60	61-100	101-130
100			
	86 мкм (25%)	86,5 мкм (28%)	99 мкм (30%)
80			
	69 мкм (12%)	77 мкм (24%)	85 мкм (27%)

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. По результатам проведенных исследований можно также утверждать, что в связи с этим повышаются эффективность закалки профильной продукции и скорости истечения металла при прессовании.

Заключение

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

- исходная структура слитка оказывает значительное влияние на характеристики сплава 6063, параметры деформации заготовок из этого сплава, скорости истечения и механические свойства получаемых пресс-изделий;
- пластичность литого металла увеличивается с увеличением степени измельчения зеренной структуры в слитке;
- скорости истечения выше при прессовании слитков с более измельченной структурой;
- прочностные свойства профилей повышаются с уменьшением размера зерна в заготовке и увеличением вытяжки.

Таким образом, использование в промышленном производстве слитков из сплава 6063 с заданной степенью измельчения зерна дает возможность повысить технологичность их обработки и получить профильную продукцию с повышенным уровнем механических свойств.

Список используемой литературы

1. *Г.С. Макаров*. Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования. Основы производства. М.: Интермет Инжиниринг, 2011.

2. *Schneider W., Lossack E.* Improvement of billet quality by use of a hot top mold with a two phase lubrication. *Light Metals*, 1987.
3. *A. Håkonsen, J. E. Hafsås, R. Ledal.* DC Casting Technology for Extrusion Billets with Improved Surface Quality // *Journal Light Metals*. 2014. P. 873-878.
4. *Н.А. Грищенко, С.Б. Сидельников, И.Ю. Губанов [и др.]*. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012.
5. *Satyanarayana, K.R., Surendra Babu, B., Ramesh Chandra, B., Nagendrababu, M., Swami Naidu, G.* Microstructural characterization of 6063 aluminium alloy nano-composites // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. 2018. 8(2). IJMPERDAPR201897. P. 851-856.
6. *Zhang, K., Marthinsen, K., Holmedal, B., Aukrust, T., Segatori, A.* Through thickness variations of deformation texture in round profile extrusions of 6063-type aluminium alloy: Experiments, FEM and crystal plasticity modelling // *Materials Science and Engineering A*. 2018. 722. P. 20-29.
7. *Pakdel, A., Witecka, A., Rydzek, G., Shri, D.N.A., Nicolosi, V.* A comprehensive analysis of extrusion behavior, microstructural evolution, and mechanical properties of 6063 Al–B4C composites produced by semisolid stir casting // *Materials Science and Engineering A*. 2018. 721. P. 28-37.

8. *Su, M.-N., Young, B.* Design of aluminium alloy stocky hollow sections subjected to concentrated transverse loads // *Thin-Walled Structures*. 2018. 124. P. 546-557.
9. *Goel P., Siddiquee A.N., Khan, N.Z., Hussain M.A., Khan Z.A., Abidi M.H., Al-Ahmari A.* Investigation on the effect of tool pin profiles on mechanical and microstructural properties of friction stir butt and scarf welded aluminium alloy 6063 // *Metals*. 2018. 8(1).74.
10. *Yu, Z.H., Zhang, D.T., Zhang, W., Qiu, C.* Deformation behavior and microstructure evolution of 6063 alloy during hot compression // *Materials Science Forum*. 2018. 913. P. 63-68.
11. *Guo, B., Zhang, Z., Li, R.* Ultrasonic and eddy current non-destructive evaluation for property assessment of 6063 aluminum alloy // *NDT and E International*. 2018. 93. P. 34-39.
12. *Donik, C.* Influence of artificial aging on the electrochemical properties of the aluminium AA 6063 alloy // *Materiali in Tehnologije*. 2018. 52(1). P. 71-75.
13. *Khelif, M., Aydi, L., Nouri, H., Bradai, C.* High strain-rate tensile behaviour of aluminium A6063 // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2018. (207169). P. 865-870.
14. *Kubásek, J., Vojtěch, D., Dvorský, D.* Structure and mechanical properties of aluminium alloy sampled from a firefighter ladder // *Manufacturing Technology*. 2017. 17(6). P. 876-881.

15. *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 // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. 8(12). P. 264-273.
16. *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. 136. 01003.
17. *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. 119. P. 396-403.
18. *Wang, Y., Zhao, S., Zhang, C.* Microstructural Evolution of Semisolid 6063 Aluminum Alloy Prepared by Recrystallization and Partial Melting Process // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017. 26(9). P. 4354-4363.
19. *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/Chinese Journal of Nonferrous Metals*. 2017. 27(9). P. 1775-1784.
20. *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 // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2017. 27(7). P. 1498-1506.

21. *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 // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. 91(5-8). P. 1753-1769.
22. *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 aluminum alloys subjected to large strain cyclic deformation // *International Journal of Plasticity*. 2017. 93. P. 137-163.

References

1. *G.S. Makarov.* Slitki iz aluminievih splavov s magniem I kremniem dlya pressovaniya. Osnovi proizvodstva. [Ingots from aluminum alloys with magnesium and silicon for pressing. Basics of production] M.: Internet Engineering, 2011.
2. *Schneider W., Lossack E.* Improvement of billet quality by use of a hot top mold with a two phase lubrication. *Light Metals*, 1987.
3. *A. Håkonsen, J. E. Hafssås, R. Ledal.* DC Casting Technology for Extrusion Billets with Improved Surface Quality. *Journal Light Metals*. 2014. P. 873-878.
4. *N.A. Grishchenko, S.B. Sidelnikov, I.Yu. Gubanov [and other].* Mekhanicheskie svoistva aluminievih splavov: monografiya. [Mechanical properties of aluminum alloys: monograph] Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2012.
5. *Satyanarayana, K.R., Surendra Babu, B., Ramesh Chandra, B., Nagendrababu, M., Swami Naidu, G.* Microstructurural characterization of 6063 aluminium alloy nano-composites. *International Journal of Mechanical and*

- Production Engineering Research and Development*. 2018. 8(2). IJMPERDAPR201897. P. 851-856.
6. Zhang, K., Marthinsen, K., Holmedal, B., Aukrust, T., Segatori, A. Through thickness variations of deformation texture in round profile extrusions of 6063-type aluminium alloy: Experiments, FEM and crystal plasticity modelling. *Materials Science and Engineering A*. 2018. 722. P. 20-29.
 7. Pakdel, A., Witecka, A., Rydzek, G., Shri, D.N.A., Nicolosi, V. A comprehensive analysis of extrusion behavior, microstructural evolution, and mechanical properties of 6063 Al–B4C composites produced by semisolid stir casting. *Materials Science and Engineering A*. 2018. 721. P. 28-37.
 8. Su, M.-N., Young, B. Design of aluminium alloy stocky hollow sections subjected to concentrated transverse loads. *Thin-Walled Structures*. 2018. 124. P. 546-557.
 9. Goel P., Siddiquee A.N., Khan, N.Z., Hussain M.A., Khan Z.A., Abidi M.H., Al-Ahmari A. Investigation on the effect of tool pin profiles on mechanical and microstructural properties of friction stir butt and scarf welded aluminium alloy 6063. *Metals*. 2018. 8(1).74.
 10. Yu, Z.H., Zhang, D.T., Zhang, W., Qiu, C. Deformation behavior and microstructure evolution of 6063 alloy during hot compression. *Materials Science Forum*. 2018. 913. P. 63-68.

11. Guo, B., Zhang, Z., Li, R. Ultrasonic and eddy current non-destructive evaluation for property assessment of 6063 aluminum alloy. *NDT and E International*. 2018. 93. P. 34-39.
12. Donik, C. Influence of artificial aging on the electrochemical properties of the aluminium AA 6063 alloy. *Materiali in Tehnologije*. 2018. 52(1). P. 71-75.
13. Khlif, M., Aydi, L., Nouri, H., Bradai, C. High strain-rate tensile behaviour of aluminium A6063. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2018. (207169). P. 865-870.
14. Kubásek, J., Vojtěch, D., Dvorský, D. Structure and mechanical properties of aluminium alloy sampled from a firefighter ladder. *Manufacturing Technology*. 2017. 17(6). P. 876-881.
15. 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. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017. 8(12). P. 264-273.
16. 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. 136. 01003.
17. 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. 119. P. 396-403.

18. Wang, Y., Zhao, S., Zhang, C. Microstructural Evolution of Semisolid 6063 Aluminum Alloy Prepared by Recrystallization and Partial Melting Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017. 26(9). P. 4354-4363.
19. 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/Chinese Journal of Nonferrous Metals*. 2017. 27(9). P. 1775-1784.
20. 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. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 2017. 27(7). P. 1498-1506.
21. 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. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. 91(5-8). P. 1753-1769.
22. 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 aluminum alloys subjected to large strain cyclic deformation. *International Journal of Plasticity*. 2017. 93. P. 137-163.