

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ
METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 671.777

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-70-80

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
РЕАЛИЗУЕМОСТИ И ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
БЕССЛИТКОВОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ ПРУТКОВ
ИЗ ОТХОДОВ СПЛАВА АД31

Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Парубок А.В., Кузин Д.И.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Представлены результаты аналитических и экспериментальных исследований процесса бесслитковой прокатки-прессования (БПП) для переработки вторичных отходов прессового производства из сплава АД31. Проведен анализ научно-технической литературы и установлено, что применение совмещенных методов обработки для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов цветных металлов позволяет повысить выход годного металла, обеспечить быстрый переход с одного типоразмера на другой при сравнительно высокой производительности. Поэтому для исследований был выбран метод бесслитковой прокатки-прессования, реализованный на установках для совмещенного литья, прокатки и прессования. На первом этапе исследований определяли реализуемость процесса с помощью аналитического метода баланса мощностей. Для определения энергосиловых параметров была разработана методика с использованием полученных авторами формул. С ее помощью проведен анализ процессов термомодеформационной обработки для получения прутков из сплава АД31 на установках совмещенной обработки СПП-200 и СПП-400 и установлены критические значения сил, действующих на валки и матрицу, моментов прокатки, а также мощности приводных двигателей валков, имеющих закрытый ящичный калибр, для различных условий обработки. Проведены экспериментальные исследования по получению опытных партий прутков диаметром 9 мм из отходов прессового производства сплава АД31 и уточнены технологические параметры процесса бесслитковой прокатки-прессования при прессовании с вытяжкой 4 и 9,7. При этом температура расплава составила $760 \pm 10^\circ\text{C}$, температура закристаллизованной заготовки 520°C , частота вращения валков 5 об/мин, степень деформации при прокатке 50%. Исследования структуры металла показали, что прутки, полученные из отходов прессового производства сплава АД31 методом бесслитковой прокатки-прессования, характеризуются волокнистым мелкозернистым строением. Такая структура позволяет получить высокий уровень пластических и прочностных свойств, которые в горячепрессованном состоянии соответствуют требованиям ГОСТ 21488-97. Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать метод бесслитковой прокатки-прессования для получения из отходов прессового производства из сплава АД31 длинномерных прутков с высоким уровнем прочностных и пластических свойств.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, вторичные отходы, бесслитковая прокатка-прессование, лигатурные прутки, энергосиловые параметры, структура, механические свойства

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Красноярского краевого фонда науки в рамках гранта № 24-29-20136.

© Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Парубок А.В., Кузин Д.И., 2024

Для цитирования

Экспериментально-аналитическая оценка реализуемости и энергосиловых параметров процесса бесслитковой прокатки-прессования прутков из отходов сплава АД31 / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Парубок А.В., Кузин Д.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 70-80. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-70-80>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL ASSESSMENT OF FEASIBILITY AND ENERGY-POWER PARAMETERS OF INGOTLESS ROLLING-EXTRUSION PROCESS OF RODS FROM AD31 ALLOY WASTE

Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Parubok A.V., Kuzin D.I.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The results of analytical and experimental studies of the process of ingotless rolling-extrusion for the processing of secondary waste from the press production of AD31 alloy are presented. The analysis of scientific and technical literature was carried out and it was found that the use of combined processing methods to obtain long-deformed semi-finished products from non-ferrous metal alloys allows to increase the yield of usable metal and to ensure a rapid transition from one standard size to another with relatively high productivity. Therefore, the method of ingotless rolling-extrusion, implemented in units for combined casting, rolling and pressing, was chosen for research. At the first stage of the research, the feasibility of the process was determined using the analytical method of power balance. To determine the energy-power parameters, a technique was developed using the formulas obtained by the authors. With its help, the analysis of thermal deformation treatment processes for obtaining rods from AD31 alloy at the combined processing units SPP-200 and SPP-400 was carried out and the critical values of the forces acting on the rolls and the matrix, mill torque, as well as the power of the drive motors of the rolls having a closed box groove for various processing conditions were established. Experimental studies were carried out to obtain batches of rods with a diameter of 9 mm from waste from the press production of AD31 alloy and the technological parameters of the ingotless rolling-extrusion process during pressing with an extract of 4 and 9.7 were clarified, while the melt temperature was $760 \pm 10^\circ\text{C}$; the temperature of the crystallized workpiece was 520°C ; the rotation frequency of the rolls was 5 rpm; the degree of deformation during rolling was 50%. Studies of the metal structure have shown that the rods obtained from the waste of the press production of the AD31 alloy by the method of ingotless rolling-extrusion are characterized by a fibrous fine-grained structure. This structure allows to obtain a high level of plastic and strength properties, which in the hot-pressed state meet the requirements of GOST 21488-97. Thus, the results of the conducted research allow to recommend the method of ingotless rolling-extrusion for obtaining long-length rods with a high level of strength and plastic properties from the waste of the press production of AD31 alloy.

Keywords: aluminum alloys, secondary waste, ingotless rolling-extrusion, ligature rods, energy-strength parameters, structure, mechanical properties

The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation and the Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the grant No. 24-29-20136.

For citation

Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Parubok A.V., Kuzin D.I. Experimental and Analytical Assessment of Feasibility and Energy-Power Parameters of Ingotless Rolling-Extrusion Process of Rods From AD31 Alloy Waste. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 70-80. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-70-80>

Введение

Анализ научно-технической литературы и результаты проведенных ранее исследований показали, что для переработки отходов прессового производства из алюминиевых сплавов целесообразно использовать совмещенные методы термомодеформационной обработки, которые позволяют получать длинномерные полуфабрикаты с минимальной трудоемкостью и высоким выходом годного [1-12].

Один из способов переработки вторичных отходов в виде стружки предложен в работах [13, 14] для сплавов на основе меди и алюминия. Он дает возможность получать из них прутки и проволоку с помощью методов компактирования, последующей прокатки-прессования брикетированной заготовки и

волочения. Однако он предназначен для мелких фракций и неприменим для крупных отходов.

Для переработки обрезки прессованных профилей авторами предлагается использовать метод бесслитковой прокатки-прессования (БПП) [3]. Суть процесса БПП заключается в получении горячепрессованных длинномерных пресс-изделий при совмещении в одном агрегате операций непрерывного литья, прокатки и прессования. Кристаллизация металла при заливке расплава в калибр вращающихся водоохлаждаемых валков, перекрытом на выходе матрицей, дает возможность обрабатывать металл со знакопеременным нагружением при высоких скоростях и степенях деформации. Поэтому преимуществами этого метода по сравнению с традиционной схемой дискретного или полунепрерывного прессования на горизонтальных

гидравлических прессах [15, 16] (табл. 1), является сравнительно большой выход годного, непрерывность обработки металла, что приводит к увеличению производительности, и небольшая энергоёмкость производства. По сравнению с прокаткой, где возможно применение только небольших обжатий за проход, процесс БПП позволяет осуществить деформацию в одной клети с высокими степенями деформации и возможностью быстрой переналадки инструмента при переходе на другой вид изделия за счет смены матрицы [2], характерными для прессования (см. табл. 1).

Таким образом, использование совмещенных методов термомодеформационной обработки позволяет получать длинномерные деформированные полуфабрикаты в виде прутков и проволоки из малопластичных металлов и сплавов с высокими технико-экономическими показателями.

Еще одним из направлений исследований можно считать изучение модифицирующей способности получаемых прутков, так как установлено [1], что при БПП реализуется высокоскоростная кристаллизация-деформация металла, при которой возможно получение ультрамелкой субзеренной структуры металла.

Целью данных исследований, таким образом, является разработка научно-технических решений по созданию технологических основ для получения длинномерных прутков из отходов прессового производства за один цикл обработки, имеющих повышенный уровень пластических характеристик металла за

счет применения высокоскоростной кристаллизации-деформации расплава.

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие задачи:

- установить принципиальную возможность переработки вторичных отходов из сплава за одну операцию на установках совмещенной обработки для получения прутков из сплава АД31, имеющих уровень механических свойств, соответствующий ГОСТ 21488-97;

- разработать методику и выполнить с ее помощью аналитическую оценку процесса БПП с определением количественного показателя реализуемости процесса, установлением температурных и энергосиловых параметров;

- по полученным данным выбрать оборудование для проведения экспериментальных исследований, мощность приводного двигателя которого не превышает паспортных значений;

- провести экспериментальные исследования процесса БПП с целью получения прутков из вторичных отходов прессового производства сплава АД31 и изучить их структуру и механические свойства.

Материалы, оборудование и методы исследования

В качестве материала для исследований по технологии БПП применяли сплав АД31 системы Al-Si-Mg, химический состав приведен в табл. 2.

Таблица 1. Сравнительные показатели технологий получения длинномерных полуфабрикатов из сплавов цветных металлов

Table 1. Comparative indicators of technologies for the production of long-length semi-finished products from non-ferrous metal alloys

| Показатель | Технология | | |
|--|--|--|--|
| | Прессование | Прокатка | БПП |
| Непрерывность | Обеспечивает только полунепрерывное прессование со стыковой сваркой профилей | Обеспечивает | Обеспечивает |
| Состав оборудования | Линия с горизонтальным гидропрессом усилием 8-12,5 МН | 15-20 и более клетей | Одна клеть |
| Габариты оборудования по длине | До 80 м | 50-100 м | 15-25 м |
| Энергоёмкость | Индивидуальный привод гидропресса и насосно-аккумуляторной станции | Групповой привод 15-20 прокатных клетей | Индивидуальный привод 1 прокатной клети |
| Гибкость перехода от одного типа профиля к другому | Обеспечивается быстрой сменой прессового инструмента | Катанка круглого сечения диаметром от 9 до 15 мм | Обеспечивается быстрой сменой прессового инструмента |
| Выход годного | 75-77% | 80-85% | 90-95% |
| Производительность | До 1 т/ч | 2,5-5 т/ч | 2,5-8 т/ч |

Таблица 2. Химический состав экспериментального алюминиевого сплава АД31

Table 2. Chemical composition of the experimental aluminum alloy AD31

| Массовая доля элемента, % | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| Si | Mg | Fe | Mn | Cu | Cr | Zn | V | Ti | B | Al |
| 0,49 | 0,52 | 0,32 | 0,024 | 0,028 | 0,005 | 0,024 | 0,011 | 0,0110 | 0,0005 | основа |

Для реализации процесса бесслитковой прокатки-прессования предлагается использовать метод бесслитковой прокатки-прессования [1] и устройство (рис. 1) по патенту [3].

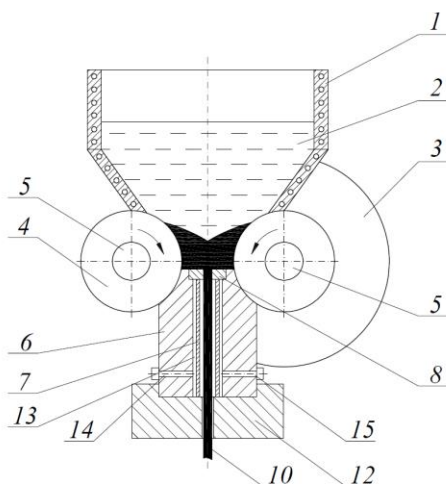


Рис. 1. Устройство для бесслитковой прокатки-прессования по патенту [3]:

- 1 – печь-миксер; 2 – расплав металла;
- 3 – валок с ручьем; 4 – валок с выступом;
- 5 – полости для охлаждения валков;
- 6 – водоохлаждаемая матрица; 7 – трубка;
- 8 – железграфитовая вставка; 9 – рабочий канал матрицы; 10 – пресс-изделие;
- 11 – калибрующий поясок матрицы;
- 12 – матрицедержатель; 13 – водоохлаждаемые каналы;
- 14, 15 – каналы для подвода и отвода хладагента

Fig. 1. A device for ingotless rolling-extrusion according to the patent [3]: 1 is a holding furnace; 2 is a metal melt; 3 is a grooved roll; 4 is a roll with a protrusion; 5 is pots for roll cooling; 6 is a water-cooled matrix; 7 is a tube; 8 is an iron-graphite insert; 9 is a working matrix channel; 10 is press product; 11 is calibration belt of the matrix; 12 is matrix holder; 13 is water-cooled channels; 14, 15 is channels for supply and discharge of refrigerant

Устройство состоит из печи-миксера 1 с расплавом 2, валка 3 с ручьем и валка 4 с выступом, имеющих полости для охлаждения 5, которые образуют закрытый калибр, перекрытый на выходе водоохлаждаемой матрицей 6 с вставкой 8, установленной на матрицедержателе 12. Матрица и валки охлаждаются в процессе работы водой через соответствующие каналы 13-15. На базе этого устройства изготовлены установки совмещенной обработки СПП-200 и СПП-400.

Полученные результаты и их обсуждение

Для оценки реализуемости процесса совмещенной обработки использовали уравнение баланса мощностей, которое для схемы, показанной на рис. 1, можно записать следующим образом:

$$N_a \geq N_p,$$

или

$$N_{тр1} + N_{тр2} \geq N_{деф} + N_{тр3} + N_{тр4},$$

где N_a – мощность, формируемая активными силами трения, действующими на контактной поверхности вращающихся валков с деформируемой заготовкой; N_p – мощность, затрачиваемая на осуществление процесса выдавливания металла через канал матрицы; $N_{тр1}$, $N_{тр2}$ – мощности сил трения, действующих на контактных поверхностях нижнего и верхнего валков; $N_{деф}$ – мощность, затрачиваемая на деформацию металла при прокатке; $N_{тр3}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на границе упругой и пластической зон перед матрицей; $N_{тр4}$ – мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на матрице.

В качестве критерия оценки реализуемости процесса принят коэффициент K_N , рассчитываемый с запасом 10% по формуле

$$K_N = \frac{N_a}{1,1N_p}. \quad (1)$$

Расчет критерия реализуемости процесса БПП выполнен для условий обработки сплава АД31 на двух установках – СПП-200 и СПП-400. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3. Исходные данные для расчетов
Table 3. Source data for calculations

| Показатели | Величина | |
|--|----------|---------|
| | СПП-200 | СПП-400 |
| Диаметр валка с выступом, мм | 214 | 385 |
| Диаметр валка с канавкой, мм | 164 | 385 |
| Размеры заготовки, мм | 14×14 | 20×20 |
| Высота зеркала матрицы, мм | 17 | 27,4 |
| Ширина калибра, мм | 15 | 22,5 |
| Вытяжка при прессовании | 4 | 9,7 |
| Усилие гидропримы матрицы, кН | 300 | 350 |
| Мощность двигателя, кВт | 14 | 40 |
| Частота вращения валков, об/мин | 5 | |
| Диаметр матрицы, мм | 9 | |
| Коэффициент обжатия при прокатке, % | 50 | |
| Показатель трения по закону Зибеля | 0,9 | |
| Температура расплава, °С | 760±10 | |
| Начальная температура заготовки, °С | 520 | |
| Начальная температура инструмента, °С | 20 | |
| Начальное сопротивление металла деформации (для сил, действующих на валки $P_1, P_2, P_{вал}$), МПа | 25 | |
| Конечное сопротивление металла деформации, МПа | 40 | |
| Среднее сопротивление металла деформации (для силы, действующей на матрицу P_m), МПа | 32,5 | |

Приведенная выше методика более подробно приведена в статье [17], при этом разработана программа в Excel и с ее помощью выполнены расчеты реализуемости процесса совмещенной обработки для алюминиевых сплавов.

На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициента K_N для различных значений показателей трения на валках ψ_B и матрице ψ_M , отражающих возможные условия трения на контакте деформируемого металла с инструментом.

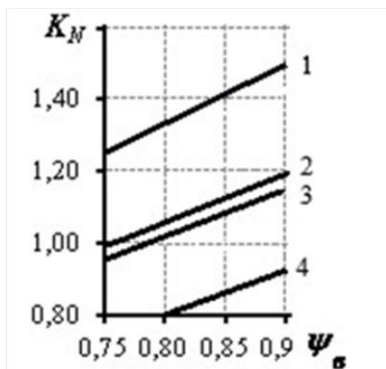


Рис. 2. Значения коэффициента запаса мощности K_N для установок СПП-200 (1, 2) и СПП-400 (3, 4) при различных условиях трения на валках и матрице для сплава АД31:

1, 3 – $\psi_M = 0,75$; 2, 4 – $\psi_M = 1,0$

Fig. 2. The values of the power reserve coefficient K_N for the SPP-200 (1, 2) and SP-400 (3, 4) installations under different friction conditions on the rolls and matrix for the AD31 alloy:

1, 3 – $\psi_M = 0,75$; 2, 4 – $\psi_M = 1,0$

Анализ полученных данных показывает, что реализуемость процесса совмещенной обработки зависит от диаметра валков и размеров калибра, причем чем они меньше (см. рис. 2, линии 1, 2), тем выше реализуемость. При этом запас при максимальных значениях показателя трения ψ_B составляет от 20 до 40%. Возможности реализации процесса БПП на установке СПП-400 (см. рис. 2, линии 3, 4) значительно ниже, причем достичь реализуемости порядка 20% удастся только при максимальных показателях трения на валках и минимальных показателях на матрице. Установлено, что при величине показателя трения на матрице $\psi_M = 1,0$ для установки СПП-400 при ширине калибра 22,5 мм и обжатии при прокатке 50% процесс даже при максимальном трении на валках неосуществим во всем диапазоне показателей трения на инструменте.

Таким образом, необходимо снижать трение на калибрующем пояске матрицы (например, применяя смазку) и добиваться максимального трения на валках (например, за счет предварительного заалюминивания контактных поверхностей валков). Эти выводы подтверждены данными экспериментальных исследо-

ваний, проведенных на установках совмещенной обработки [1, 2] при заданных параметрах, и свидетельствовали об устойчивой реализации процесса БПП для обработки алюминиевых сплавов.

Для определения энергосиловых параметров процесса БПП и выбора мощности приводного электродвигателя использовали методику, изложенную в работах [1, 2]. В соответствии с ней для расчета энергосиловых параметров совмещенной прокатки-прессования принята схема обработки закристаллизовавшейся в валках заготовки (рис. 3).

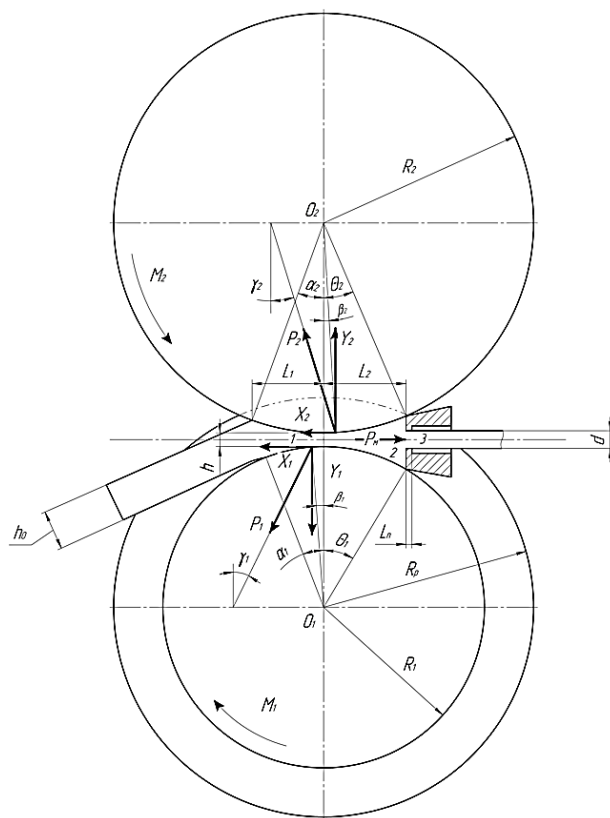


Рис. 3. Схема сил и моментов, действующих от металла на валки в процессе совмещенной обработки

Fig. 3. Diagram of forces and moments acting from the metal on the rolls during combined processing

Силу, действующую на валки, можно найти по выражению

$$P_{\text{вал}} = \tau (F_1 + F_2), \tag{2}$$

где $\tau = \psi \cdot \sigma_s$ – значение напряжения контактного трения (ψ – показатель трения по Зибелю; σ_s – сопротивление металла деформации); F_1, F_2 – площади контакта валков с металлом соответственно для нижнего валка с канавкой и верхнего валка с выступом.

$$F_1 = 0,0349 (\alpha_1 + \theta_1) R_1 (b + 2h),$$

$$F_2 = 0,0349 (\alpha_2 + \theta_2) R_2 b,$$

где b – ширина калибра; h – высота калибра в наименьшем сечении; $\alpha_1, \theta_1, \alpha_2, \theta_2$ – углы, ограничившие очаг деформации (см. **рис. 3**).

Для определения контактной площади при прокатке необходимо найти величину L_1 (см. **рис. 3**) и соответствующий ей центральный угол α (угол захвата), зная величину абсолютного обжатия $\Delta h = h_0 - h$:

$$L_1 = \sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2}. \quad (3)$$

Отсюда центральный угол α равен

$$\sin \alpha = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{\Delta h}{2R}\right)^2}. \quad (4)$$

Для определения контактной площади в зоне распрессовки необходимо найти величину L_2 (см. **рис. 2**) и соответствующий ей центральный угол θ , которые характеризуют удаленность зеркала матрицы от плоскости, проходящей через оси вращения валков [2].

$$\sin \theta = \frac{L_2}{R}. \quad (5)$$

В соответствии с принятой схемой очага деформации (см. **рис. 2**) формула для расчета силы, действующей на нижний валок с канавкой радиусом R_1 , будет выглядеть следующим образом:

$$P_1 = 0,0349 \psi \sigma_s (\alpha_1 + \theta_1) R_1 (b + 2h). \quad (6)$$

Для второго валка с выступом выражение для силы, действующей на верхний валок с выступом радиусом R_2 , запишется как

$$P_2 = 0,0349 \psi \sigma_s (\alpha_2 + \theta_2) R_2 b. \quad (7)$$

При условии, что $R_1 = R_2 = R$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$ и $\theta_1 = \theta_2 = \theta$, формула для определения силы, действующей на валки, упрощается и имеет следующий вид:

$$P_b = 0,07 \psi \sigma_s (\alpha + \theta) R (b + h). \quad (8)$$

Силу, действующую на матрицу, рекомендуется определять по формуле Л.Г. Степанского [18], имеющую следующий вид:

$$P_m = 2,577 \sigma_{ср} F_m \ln \mu + 3,14 \sigma_{ср} \mu r_m L_m, \quad (9)$$

где μ – коэффициент вытяжки при прессовании; F_m – площадь распрессованной заготовки; r_m – радиус калибрующего отверстия матрицы; L_m – величина рабочего пояса матрицы; $\sigma_{ср} = 0,5(\sigma_{сн} + \sigma_{ск})$ – среднее сопротивление деформации в зоне прессования, среднее сопротивление деформации, где $\sigma_{сн}$ – начальное сопротивление деформации; $\sigma_{ск}$ – конечное сопротивление деформации.

Крутящие моменты можно определить следующим образом (см. **рис. 2**):

– для валка с канавкой радиусом R_1

$$M_{p1} = P_1 R_1 \sin (\gamma_1 + \beta_1); \quad (10)$$

– для валка с выступом радиусом R_2

$$M_{p2} = P_2 R_2 \sin (\gamma_2 + \beta_2). \quad (11)$$

Момент двигателя прокатного стана $M_{дв}$ рассчитывают по формуле А.И. Целикова [19]:

$$M_{дв} = M_p / \eta_{пр}, \quad (12)$$

где M_p – расчетный момент двигателя, Н; $\eta_{пр} = 0,5-0,7$ – коэффициент полезного действия (КПД) в линии главного привода прокатной установки, учитывающий потери энергии на трение в муфтах, шпинделях, узлах их уравнивания и в редукторе.

Скорость вращения валков n_b рассчитывают по формуле

$$n_b = \frac{n_{дв}}{i}, \quad (13)$$

где $n_{дв}$ – скорость вращения ротора двигателя, об/мин; i – передаточное число редуктора.

Мощность двигателя прокатного стана $N_{дв}$, Вт, определяется как

$$N_{дв} = M_{дв} \cdot \omega_b, \quad (14)$$

где $M_{дв}$ – момент двигателя прокатной установки, Н·м; ω_b – угловая скорость вращения валков, с⁻¹.

$$\omega_b = \frac{\pi \cdot n_b}{30}. \quad (15)$$

С учетом рекомендуемого при выборе двигателей прокатных станов запаса [19, 20], составляющего 25%, мощность двигателя определяют по выражению

$$N_{дв} = 1,25 M_{дв} \omega_b = 1,25 (M_p / \eta_{пр}) \omega_b. \quad (16)$$

С использованием представленной выше методики разработана программа в Excel, и с использованием исходных данных **табл. 4** определены энергосиловые параметры процесса БПП для получения прутков из отходов алюминиевого сплава АД31 и выбрана мощность двигателя для установки.

Расчеты по приведенной выше методике были произведены для условий прокатки-прессования сплава АД31 для двух установок СПП-200 и СПП-400 (см. **табл. 3**). Результаты расчетов приведены в **табл. 4**.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что мощность двигателя для проведения экспериментальных исследований не превышает допустимых значений для выбранных установок (см. **табл. 3**). Анализ распределения сил и моментов на валках показывает различие в них для валка с канавкой и валка с выступом. При этом эти параметры вы-

ше для вала с канавкой, так как площадь контакта металла с инструментом в этом случае существенно различается. Сила, действующая на матрицу, не превышает допустимого усилия гидроприжима (см. табл. 3), что позволяет при заданной величине вытяжки при прессовании гарантировать отсутствие «уса» и проникновение его между валками и матрицей.

На основании полученных данных аналитических расчетов спроектирован инструмент и выбраны технологические параметры для проведения экспериментальных исследований по получению прутков диаметром 9 мм из обрезки прессованных профилей сплава АД31 (рис. 4, а). В итоге получили пруток

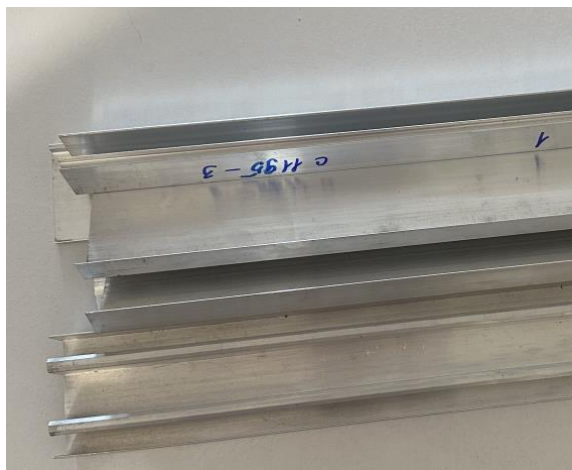
диаметром 9 мм, длиной более 30 м, который был смотан в бухту (рис. 4, б).

В соответствии с методикой проведения эксперимента из имеющихся профилей (см. рис. 4, а) готовили расплав и при температуре $760 \pm 10^\circ\text{C}$ заливали его во вращающиеся валки линии бесслитковой прокатки-прессования, один из вариантов которой показан на рис. 5. Закристаллизовавшаяся заготовка при температуре 520°C обжималась валками с обжатием 50% и после распрессовки под действием активных сил трения выдавливалась в виде прутка круглого поперечного сечения через калибрующее отверстие матрицы диаметром 9 мм.

Таблица 4. Энергосиловые параметры процесса БПП

Table 4. Energy-power parameters of the ingotless rolling-extrusion process

| Показатели | Величина | |
|---|----------|---------|
| | СПП-200 | СПП-400 |
| Площадь контакта с металлом для нижнего вала F_1 , мм ² | 2885,7 | 8814,9 |
| Площадь контакта с металлом для верхнего вала F_2 , мм ² | 1703,5 | 4666,7 |
| Угол α , градусов | 16,8 | 13,1 |
| Угол θ , градусов | 14,7 | 17,8 |
| Сила, действующая на нижний валок P_1 , кН | 64,9 | 198,3 |
| Сила, действующая на верхний валок P_2 , кН | 38,3 | 105,0 |
| Сила, действующая на валки $P_{\text{вал}}$, кН | 103,3 | 303,3 |
| Сила, действующая на матрицу $P_{\text{м}}$, кН | 35,2 | 130,7 |
| Крутящий момент M_1 , кН·м | 2,7 | 19,1 |
| Крутящий момент M_2 , кН·м | 2,1 | 10,1 |
| Крутящий момент M , кН·м | 4,8 | 29,2 |
| Мощность двигателя для нижнего вала, кВт | 2,8 | 18,6 |
| Мощность двигателя для верхнего вала, кВт | 2,2 | 9,0 |
| Мощность двигателя, кВт | 5,0 | 27,6 |



а



б

Рис. 4. Вид отходов в виде обрезки прессованных профилей (а) и бухта пресс-изделий (б) из сплава АД31, полученных бесслитковой прокаткой-прессованием

Fig. 4. The type of waste in the form of cuttings of pressed profiles (a) and a coil of press products (b) made of alloy AD31 obtained by ingotless rolling-extrusion

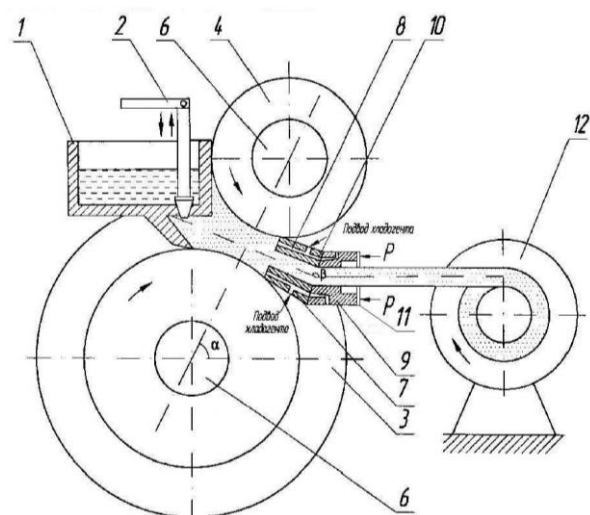


Рис. 5. Общий вид линии бесслитковой прокатки-прессования: 1 – печь-миксер; 2 – регулятор литниковой системы; 3 – валок с ручьем; 4 – валок с выступом; 5 – станина; 6 – полости для охлаждения валков; 7 – форкамера; 8 – каналы для охлаждения форкамеры; 9 – матрица; 10 – полости для охлаждения матрицы; 11 – гидравлический прижим; 12 – устройство приемки пресс-изделия, 13 – нажимное устройство; 14 – пластины; 15 – ролики

Fig. 5. General view of the ingotless rolling-extrusion line: 1 is a holding furnace; 2 is a gating system regulator; 3 is a grooved roll; 4 is a roll with a protrusion; 5 is a bed; 6 is pots for roll cooling; 7 is a pre-chamber; 8 is channels for cooling the pre-chamber; 9 is a matrix; 10 is pots for cooling the matrix; 11 is hydraulic clamp; 12 is press product acceptance device, 13 is screwdown; 14 is plates; 15 is rollers

Технологические параметры процесса БПП для установки СПП-400 были следующими:

- температура расплава $760 \pm 10^\circ\text{C}$;
- температура инструмента 20°C ;
- частота вращения валков 5 об/мин;
- степень деформации при прокатке 50%;
- вытяжка при прессовании 9,7.

В табл. 5 приведены результаты экспериментов по определению энергосиловых параметров процесса БПП для сплава АД31 в сравнении с данными, полученными аналитическим расчетом. Их анализ позволяет сделать вывод о достаточной сходимости экспериментальных и расчетных данных, а небольшое различие вызвано расхождением в данных по сопротивлению деформации металла.

Результаты исследования механических свойств прутков, полученных методом БПП, приведены в табл. 6 в сравнении с требованиями ГОСТ.

Анализ механических свойств прутков из сплава АД31, полученных по технологии БПП из отходов прессового производства, показал, что их свойства в горячепрессованном состоянии соответствуют требованиям существующего стандарта. При этом пластические свойства прутка, полученного БПП, превышают требования стандарта более чем в два раза.

Исследование микроструктуры прутка, полученного по технологии БПП из вторичных отходов сплава АД31, показало, что в структуре на фоне алюминиевого твердого раствора располагаются мелкие частицы избыточных фаз, расположенные в строчки по направлению деформации, либо образуют скопления (рис. 6, а), при этом формируется устойчивая мелкозернистая структура [1]. Исследование образцов в поляризованном свете позволило установить, что структура прутка, полученного по технологии БПП, характеризуется волокнистым строением (рис. 6, б).

Таблица 5. Энергосиловые параметры процесса БПП для сплава АД31

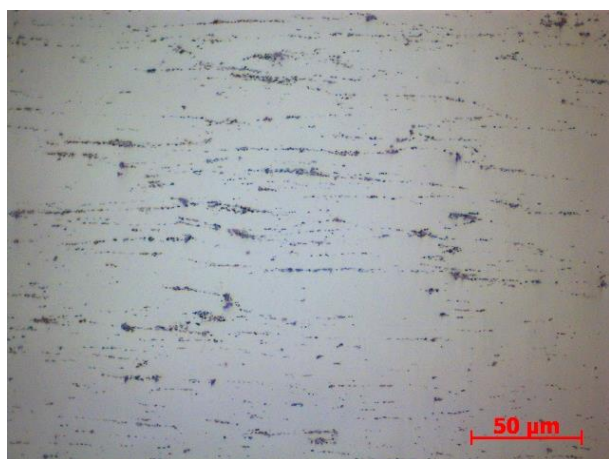
Table 5. Energy-power parameters of the ingotless rolling-extrusion process for the AD31 alloy

| P_v | | P_m | | M_{v1} | | M_{v2} | |
|---------|-------------|--------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| расчет | эксперимент | расчет | эксперимент | расчет | эксперимент | расчет | эксперимент |
| СПП-400 | | | | | | | |
| 303,3 | 285 | 130,7 | 154 | 19,1 | 17,2 | 10,1 | 9,6 |
| СПП-200 | | | | | | | |
| 103,3 | 78.6 | 35,2 | 32.3 | 2,7 | 3.3 | 2,1 | 1.6 |

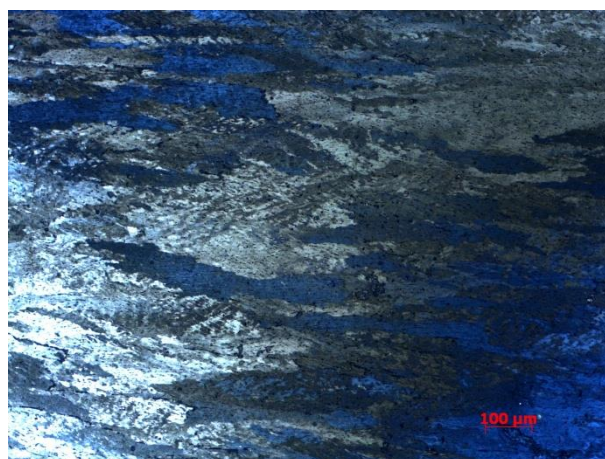
Таблица 6. Механические свойства прутков, полученных БПП и по ГОСТ 21488-97

Table 6. Mechanical properties of rods obtained by ingotless rolling-extrusion and according to the state standard GOST 21488-97

| Характеристика | БПП | ГОСТ 21488-97 |
|--------------------------------|-------------|---------------|
| Условный предел текучести, МПа | 86 ± 2 | 60 |
| Временное сопротивление, МПа | 127 ± 2 | 90 |
| Относительное удлинение, % | 35 ± 1 | 15 |



а



б

Рис. 6. Микроструктура прутков диаметром 9 мм из сплава АД31:

а – светлое поле, $\times 500$; б – поляризованный свет, $\times 100$

Fig. 6. Microstructure of rods with a diameter of 9 mm made of AD31 alloy

a is light field, $\times 500$; б is polarized light, $\times 100$

Заключение

Таким образом, по результатам исследований можно сделать следующие выводы:

– по разработанной методике определены параметры и выбрано оборудование для проведения экспериментальных исследований, а также проверены ограничения по мощности приводного двигателя для используемых установок совмещенной обработки металла;

– установлена принципиальная возможность изготовления за один цикл обработки на установках совмещенной обработки прутков из вторичных отходов прессового производства с требуемым стандартом уровнем механических свойств;

– получены новые данные по структуре и механическим свойствам деформированных полуфабрикатов из вторичных отходов прессового производства сплава АД31 при реализации процесса БПП;

– на основании полученных результатов исследований сделан вывод о возможности получения из отходов в виде обрезки прессованных профилей из сплава АД31 качественных деформированных полуфабрикатов в виде длинномерных прутков с высоким уровнем прочностных и пластических свойств.

Список источников

1. Особенности структурообразования и свойства металла при высокоскоростной кристаллизации–деформации и модифицировании алюминиевых сплавов: монография / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Довженко Н.Н., Дроздова Т.Н. и др. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. 180 с.
2. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обра-

ботки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.

3. Пат. 2724758. Российская Федерация. Устройство для бесслитковой прокатки и прессования металла / Сидельников С.Б., Старцев А.А., Гильманшина Т.Р. и др., опубл. 25.06.2020, бюл. №18.
4. Непрерывное литье–прессование цветных металлов / В.М. Сергеев, Ю.В. Горохов, В.В. Соболев и др. М.: Metallurgia, 1990.
5. Сальников А.В., Стрелов А.В., Мотков М.М. Производство катанки из твердых алюминиевых сплавов методом совмещенной прокатки–прессования // Цветные металлы и минералы: сборник докладов Девятого международного конгресса. Красноярск, 11–15 сентября 2017 года. Красноярск, 2017. С. 674–681.
6. Salnikov A., Heinzl C. The Combined Method for Producing Long Products from Aluminium and Aluminium Alloys // Minerals, Metals and Materials Series. This link is disabled., 2021, vol. 6, pp. 291–298.
7. Heinzl C., Salnikov C.A., Müller S. Experimental and Numerical Examinations Regarding the Material Flow of Combined Rolling Extrusion Process // Minerals, Metals and Materials Series. This link is disabled., 2021, vol. 6, pp. 158–162.
8. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex / Sizyakov V.M., Vlasov A.A., Bazhin V.Y. // Tsvetnyye Metally. 2016, no. 1, pp. 32–37.
9. Сизяков В.М., Бажин В.Ю., Власов А.А. Состояние и перспективы развития производства алюминия // Metallurg. 2010. №7. С. 2–6.
10. Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш., Николаев В.Ал. Совмещенные процессы литья и деформации металлов. М.: Изд-во МГОУ, 2009.
11. Shatalov R.L., Genkin A.L. Operating a sheet-rolling complex to minimize energy costs // Metallurgist. 2008, 52 (9–10), pp. 485–490.

12. Улучшение качества поверхности низколегированных цинковых полос при отливке заготовки в двухвалковую форму и прокатке на четырехвалковом стане 400 / Р.Л. Шаталов, А. М. Кац, М.В. Кудин и др. // Цветные металлы. 2002. № 10. С. 76-81.
13. Технологические основы получения материалов и изделий из сыпучих отходов сплавов алюминия: монография / Н.Н. Загиров, Ю.Н. Логинов, С.Б. Сидельников, Е.В. Иванов. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2019.
14. 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.
15. Саха П.К. Технология прессования алюминия. М.: НП «АПРАЛ», 2015.
16. Щерба В.Н. Прессование алюминиевых сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001.
17. Расчетно-экспериментальная оценка условия реализации процесса совмещенной прокатки-прессования с использованием метода баланса мощностей / Н.Н. Загиров, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, В.М. Беспалов // Цветная металлургия. Известия высших учебных заведений. 2016. №1. С. 19–25.
18. Степанский Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1979.
19. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. М.: Металлургия, 1980.
20. Королев А.А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов. М.: Металлургия, 1987.
5. Salnikov A.V., Strelov A.V., Motkov M.M. Production of wire rods from hard aluminum alloys by combined rolling-pressing. *Cvetnye metally i mineraly: sbornik dokladov Devyatogo mezhdunarodnogo kongressa* [Non-ferrous metals and minerals. Proceedings of the 9th International Congress]. Krasnoyarsk, 2017;674-677. (In Russ.)
6. Salnikov A., Heinzl C. The Combined Method for Producing Long Products from Aluminium and Aluminium Alloys. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2021;6:291-298.
7. Heinzl C., Salnikov A., Müller S. Experimental and Numerical Examinations Regarding the Material Flow of Combined Rolling Extrusion Process. *Minerals, Metals and Materials Series*. 2021;6:158-162.
8. Sizyakov V.M., Vlasov A.A., Bazhin V.Y. Strategy tasks of the Russian metallurgical complex. *Tsvetnye Metally*. 2016;(1):32-37.
9. Sizyakov V.M., Bazhin V.Yu., Vlasov A.A. The state and prospects of development of aluminum production. *Metallurg* [Metallurgist], 2010;(7):2-6.
10. Shatalov R.L., Boshamdjiev N.S., Nikolaev V.A.I. *Sovmeshchennye processy litya i deformacii metallov* [Combined processes of casting and deformation of metals]. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 2009. (In Russ.)
11. Shatalov, R.L., Genkin, A.L. Operating a sheet-rolling complex to minimize energy costs. *Metallurgist*, 2008;52(9-10):485-490.
12. Shatalov, R.L., Kats, A.M., Kudin et al. Improvement of surface quality of low-alloy zinc strips upon billet casting into two-roll mold and rolling in four-high mill 400. *Tsvetnye Metally* [Non-ferrous metals], 2002;(10):76-81. (In Russ.)

References

1. Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Dovzhenko N.N., Drozdova T.N. et al. *Osobennosti strukturoobrazovaniya i svoystva metalla pri vysokoskorostnoj kristallizacii–deformacii i modifizirovaniy alyuminievykh splavov: monografiya* [Features of structure formation and properties of metal during high-speed crystallization-deformation and modification of aluminum alloys: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal District. Univ., 2015, 180 p. (In Russ.)
2. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. *Kombinirovannye i sovmeshchennye metody obrabotki cvetnykh metallov i splavov: monografiya* [Combined methods of processing non-ferrous metals and alloys: monograph]. Moscow: MAKS Press, 2005, 344 p. (In Russ.)
3. Sidelnikov S.B., Startsev A.A., Gilmanshina T.R. et al. *Ustrojstvo dlya besslitkovej prokatki i pressovaniya metalla* [A device for ingotless rolling-extrusion of metal]. Patent RF, no. 2724758, 2006.
4. Sergeev V.M., Gorokhov Yu.V., Sobolev V.V. et al. *Nepreryvnoe lite-pressovanie cvetnykh metallov* [Continuous casting and pressing of non-ferrous metals]. Moscow: Metallurgy, 1990. (In Russ.)
13. Zagirov N.N., Loginov Yu.N., Sidelnikov S.B., Ivanov E.V. *Tekhnologicheskie osnovy polucheniya materialov i izdelij iz sypuchih othodov splavov alyuminiya: monografiya* [Technological bases of obtaining materials and products from bulk waste of aluminum alloys: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian federal university, 2019. (In Russ.)
14. Zagirov N.N., Loginov Yu.N. *Tekhnologicheskie osnovy polucheniya materialov i izdelij iz sypuchih othodov splavov alyuminiya: monografiya* [Technological bases for the production of materials and products from bulk chip waste of copper and its alloys by pressure treatment methods: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian federal university, 2015. (In Russ.)
15. Sakha P.K. *Tekhnologiya pressovaniya alyuminiya* [Aluminum pressing technology]. Moscow: NP APRAL, 2015. (In Russ.)
16. Shcherba V.N. *Pressovanie alyuminievykh splavov* [Pressing of aluminum alloys]. Moscow: Intermet Engineering, 2001. (In Russ.)
17. Zagirov N.N., Dovzhenko N.N., Sidelnikov S.B., Bespalov V.M. Computational and experimental assessment of the conditions for the implementation of the combined rolling-pressing process using the pow-

- er balance method. *Tsvetnaya metallurgiya. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij* [Non-ferrous metallurgy. Proceedings of higher educational institutions], 2016;(1):19-25. (In Russ.)
18. Stepanyuk L.G. *Raschety processov obrabotki metallov davleniem* [Calculations of metalworking processes by pressure]. Moscow: Mashinostroenie, 1979. (In Russ.)
19. Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotyan S.E. *Teoriya prodolnoj prokatki* [Theory of longitudinal rolling]. Moscow: Metallurgy, 1980. (In Russ.)
20. Korolev A.A. *Mekhanicheskoe oborudovanie prokatnyh i trubnyh cekhov* [Mechanical equipment of rolling and pipe shops]. Moscow: Metallurgy, 1987. (In Russ.)

Поступила 03.06.2024; принята к публикации 01.07.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 03/06/2024; revised 01/07/2024; published 24/12/2024

Сидельников Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

Лопатина Екатерина Сергеевна – кандидат технических наук, доцент,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857,

Парубок Андрей Васильевич – аспирант,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: andrej.parubok@yandex.ru. ORCID 0009-0009-1032-4301

Кузин Дмитрий Игоревич – студент магистратуры,
Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: 255417@bk.ru

Sergey B. Sidelnikov – DrSc (Eng.), Professor,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

Ekaterina S. Lopatina – PhD (Eng.), Associate Professor,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857

Andrey V. Parubok – Postgraduate Student,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: andrej.parubok@yandex.ru. ORCID 0009-0009-1032-4301

Dmitry I. Kusin – Master's Student,
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: 255417@bk.ru