



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

УДК 66-932.2

DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-62-77

ИЗУЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ СПЛАВА Al-PЗМ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВМЕЩЕННЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ВОЛОЧЕНИЯ

Ворошилов Д.С.¹, Лебедева О.С.¹, Беспалова Д.Д.¹,
Дурнопьянова А.С.¹, Бернгардт В.А.^{1,2}, Ворошилова М.В.¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

² ООО «РУСАЛ ИТЦ», Красноярск, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты силовых параметров при получении прутков и проволоки диаметром 2 мм из них и механических и электрофизических свойств полученных полуфабрикатов из сплава системы Al-PЗМ с содержанием редкоземельных металлов в количестве 1%. Проволока получена в результате реализации технологии методами совмещенной прокатки-прессования (СПП), совмещенного литья и прокатки-прессования (СЛиПП) и волочения. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из экспериментального сплава на лабораторной установке СПП (СЛиПП)-200. Получены данные по временному сопротивлению разрыву при растяжении и относительному удлинению горячепрессованных прутков диаметром 5 и 9 мм, а также проволоки диаметром 2 мм, полученной из этих прутков после реализации процессов СПП и СЛиПП. Установлено, что предложенные режимы обработки позволяют получать методом комбинированной прокатки-прессования прутки диаметром 9 и 5 мм из заготовок размерами 14×14 мм (для процесса СПП), а также получать прутки из расплава, кристаллизующегося в валках и исключая передел в виде получения твердой заготовки (для метода СЛиПП). Усилия на валках не превышают 323 кН для процесса СПП и 279 кН для процесса СЛиПП. Усилия на матрице не превышают 206 кН для процесса СПП и 171 кН для процесса СЛиПП. Пластичность полученных прутков диаметром 5 и 9 мм после методов СПП и СЛиПП была достаточной для последующего волочения проволоки диаметром 2 мм без единого промежуточного отжига (значения относительного удлинения варьировались от 17 до 35% в зависимости от режима получения).

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, редкоземельные металлы, проволока, механические свойства, литье, совмещенное литье и прокатка-прессование, совмещенная прокатка-прессование, волочение, силовые параметры

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-29-00028, <https://rscf.ru/project/23-29-00028/>.

В работе принимали участие студенты кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»: Шабарин Петр Николаевич, Назаренко Дмитрий Витальевич, Киреев Максим Евгеньевич.

© Ворошилов Д.С., Лебедева О.С., Беспалова Д.Д., Дурнопьянова А.С., Бернгардт В.А., Ворошилова М.В., 2023

Для цитирования

Изучение режимов получения проволоки из сплава Al-PЗМ с применением совмещенных методов обработки и последующего волочения / Ворошилов Д.С., Лебедева О.С., Беспалова Д.Д., Дурнопьянова А.С., Бернгардт В.А., Ворошилова М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 62-77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-62-77>



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

STUDY ON MODES OF PRODUCING WIRE FROM AL-REM ALLOYS USING COMBINED METHODS OF PROCESSING AND SUBSEQUENT DRAWING

Voroshilov D.S.¹, Lebedeva O.S.¹, Bepalova D.D.¹,
Durnopyanova A.S.¹, Berngardt V.A.^{1,2}, Voroshilova M.V.¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

² LLC RUSAL ETC, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The paper presents the force parameters, when producing rods and wire from them with a diameter of 2 mm, and mechanical and electrophysical properties of the manufactured semi-finished products from an alloy of the Al-REM system, containing 1% of rare earth metals. The wire was produced by the methods of combined rolling-extrusion (CRE), combined casting and rolling-extrusion (CCRE) and drawing. The paper contains the results of experimental studies on the process of producing long deformed semi-finished products from an experimental alloy on the CRE (CCRE)-200 laboratory unit. The authors obtained data on ultimate tensile strength and percentage elongation of hot extruded rods with a diameter of 5 and 9 mm, as well as wire with a diameter of 2 mm produced from these rods after the CRE and CCRE processes. It has been established that the proposed processing modes make it possible to produce rods with a diameter of 9 mm and 5 mm by the combined rolling-extrusion method from billets with dimensions of 14×14 mm (for the CRE process), as well as to produce rods from melt that crystallizes in rolls, excluding a process stage of producing a solid billet (for the CCRE method). Roll forces do not exceed 323 kN for the CRE process and 279 kN for the CCRE process. The forces on the die do not exceed 206 kN for the CRE process and 171 kN for the CCRE process. Plasticity of the produced rods with a diameter of 5 and 9 mm after the CRE and CCRE methods was sufficient for the subsequent drawing of a wire with a diameter of 2 mm without a single intermediate annealing (percentage elongation varied from 17 to 35% depending on the production mode).

Keywords: aluminum alloys, rare earth metals, wire, mechanical properties, casting, combined casting-rolling-extrusion, combined rolling-extrusion, drawing, force parameters

The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation, No. 23-29-00028, <https://rscf.ru/project/23-29-00028/>.

The participants of the research included the students of the Metal Forming Department of the Non-Ferrous Metals Institute, Siberian Federal University: Petr N. Shabarin, Dmitrii V. Nazarenko, Maksim E. Kireev.

For citation

Voroshilov D.S., Lebedeva O.S., Bepalova D.D., Durnopyanova A.S., Berngardt V.A., Voroshilova M.V. Study on Modes of Producing Wire from Al-REM Alloys Using Combined Methods of Processing and Subsequent Drawing. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 62-77. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-62-77>

Введение

Постоянный рост применения алюминиевых сплавов в энергетике, транспорте, строительстве и других отраслях техники требует разработки новых высокоэффективных технологий, обеспечивающих увеличение их прочности, термостабильности, надежности и долговечности [1-3]. Применение алюминия в этих отраслях объясняется тем, что помимо высокой электропроводности он позволяет значительно облегчить конструкцию силовых проводов, что, по сравнению с медными проводами, позволяет добиться увели-

чения пропускной способности линий электропередачи в 1,5-2 раза при использовании старых опор [4]. Другой причиной увеличения доли потребления алюминиевой катанки являются большие темпы роста цен на медь, которые на сегодняшний день в 4 раза выше цены на алюминий.

Наряду с экономическими преимуществами использования алюминия для производства силовых проводов, хорошо известны и его недостатки, сильно ограничивающие его применение в энергетике. В качестве материалов для проводов в России выпускают в основном катанку из алюминия марки А5Е и А7Е, имеющую низкие проч-

ностные свойства (временное сопротивление разрыву в твердом состоянии до 98 МПа) и термостойкость [3]. Недостаточная прочность, низкое сопротивление ползучести алюминиевой проволоки, изготовленной из такой катанки, даже при нормальной температуре эксплуатации под воздействием длительной нагрузки может привести к ее разрушению. При этом с увеличением рабочей температуры «ползучесть» алюминиевой проволоки повышается, что делает ее непригодной для изготовления термостойких проводов. Спрос на алюминий растет в последние годы, в основном за счет быстро развивающейся китайской экономики, которая уже потребляет около 40% производимого в мире алюминия [4].

Для изготовления алюминиевой катанки в России и за рубежом применяют литейно-прокатные агрегаты, имеющие высокую производительность и позволяющие получать ряд типоразмеров продукции различного диаметра. В России на сегодняшний день эксплуатируется 14 ЛПА, большая часть которых введена в эксплуатацию еще в 70-х годах прошлого столетия и не соответствует современному уровню оборудования. Прежде всего, это связано с недостаточной надежностью прокатных станов для производства катанки из высокопрочных электротехнических сплавов алюминия.

Эти ситуации делают актуальными исследования в области электротехнических сплавов Al-PЗМ, новых технологий их обработки и оборудования с целью получения длинномерных деформированных полуфабрикатов, имеющих повышенный уровень механических свойств и термостойкости при удовлетворительных характеристиках удельного электросопротивления [5-19]. В работах [5, 6] подробно изучены эвтектические превращения при добавке церия в алюминий. В работах [8, 12, 13, 19] изучено влияние редкоземельных элементов в алюминии на электропроводность сплава. Структура и механические свойства сплавов системы Al-PЗМ изучены в работах [7, 9, 11, 14, 15-18]. Легирование алюминия церием и лантаном в равной степени увеличивает прочностные свойства алюминиевого сплава, но на электропроводность более благоприятное влияние оказывает именно церий [13].

В основу энергосберегающих технологий производства длинномерных изделий положено развитие и применение совмещенных процессов прокатки-прессования (СПП) и литья и прокатки-прессования (СЛиПП) [20, 21]. Технологиче-

ские особенности этих способов позволяют получать длинномерные деформированные полуфабрикаты с повышенным уровнем механических характеристик, выходом годного и снизить затраты на производство [22-26].

Учитывая актуальность данной проблемы, целью работы является разработка режимов совмещенной обработки и последующего волочения деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из алюминиевого сплава с содержанием 1% PЗМ. Для достижения данной цели было предусмотрено выполнение следующих задач:

1. Проведение экспериментальных исследований по получению прутков методами СПП и СЛиПП из сплава Al-1%PЗМ и проволоки из этих прутков.
2. Изучение силовых параметров процессов СПП и СЛиПП при получении прутков.
3. Исследование механических свойств полученных деформированных полуфабрикатов.
4. Исследование удельного электрического сопротивления полученных методами СПП и СЛиПП прутков и проволоки из них.

Материалы и методы исследования

Для проведения опытов по получению прутков и проволоки и дальнейшего их волочения в лаборатории методом СЛиПП и СПП на установке СПП (СЛиПП)-200 были получены прутки из экспериментального сплава. PЗМ (Ce и La) в сплаве содержалось до 1 мас.%, состав исследуемого сплава и режимы получения прутков приведены в **табл. 1 и 2**.

Для проведения опытов была применена следующая методика [20, 22, 26]. В электрической печи сопротивления нагревался расплав до заданной температуры и выдерживался 10-15 мин при процессе СЛиПП. Для процесса СПП в электрической печи сопротивления нагревались заготовки до заданной температуры и также выдерживались 10-15 мин. Температуру нагрева контролировали хромель-алюмелевой термопарой и потенциометром КСП-3. Одновременно осуществляли нагрев валков до максимальной температуры 100°C при помощи печи, выполненной в виде кожуха по форме валков и снабженного нихромовыми нагревателями. После нагрева до необходимой температуры приводили во вращение валки установки со скоростью 4 или 8 об/мин.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава
Table 1. Chemical composition of the alloy under study

Содержание, %					
Al	Концентрация РЗМ, мас. %	Ni	Fe	B	Ti
Основа	1,0	0,004	0,1	0,001	0,006

Таблица 2. Технологические режимы СЛиПП и СПП
Table 2. Process modes of CCRE and CRE

Параметры	СЛиПП				СПП			
	$T = 750^{\circ}\text{C}$		$T = 780^{\circ}\text{C}$		$T = 480^{\circ}\text{C}$		$T = 550^{\circ}\text{C}$	
	Диаметр прутка, мм							
Скорость деформации $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ (4 об/мин)	9	5	9	5	9	5	9	5
Скорость деформации $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ (8 об/мин)	9	5	9	5	9	5	9	5

Расплав (для СЛиПП) или заготовку (для СПП) задавали в калибр и, после того как произошло застывание, при помощи тензометрической аппаратуры фиксировали усилие, оказываемое металлом на валки. Далее металл обжимался в калибре и достигал матрицы, смонтированной на матрице-держателе. С помощью гидравлического цилиндра матрица была плотно поджата к валкам снизу, поэтому металл распрессовывался, заполняя калибр в зоне распрессовки, а затем за счет постоянного поступления металла в калибр выдавливался через калибрующее отверстие матрицы в виде прутка. Далее полученные пресс-изделия подвергались испытаниям по определению механических, электрофизических свойств.

Сила на матрице фиксировалась тензометрической аппаратурой с помощью кольцевой месдозы. В качестве основной регистрирующей аппаратуры применяли универсальную тензостанцию ZET 017-T8.

Для фиксации энергосиловых параметров процесса совмещенной прокатки-прессования использовались месдозы, каждая из которых представляла собой металлический корпус с наклеенными на него тензодатчиками.

Тензометрическая станция ZET 017-T8 предназначена для проведения тензоизмерений одновременно по нескольким каналам. Прибор отличается высокой точностью измерений и регистрации сигналов. Возможны различные вари-

анты подключения к ПК, а также работа в автономном режиме.

Тензостанция может работать в автономном режиме. Сначала тензостанция подключается к компьютеру и задается сценарий работы в автономном режиме. Далее проводятся измерения с записью сигналов на SD-карту. После окончания эксперимента тензостанция вновь подключается к компьютеру, данные с SD-карты переписываются на компьютер и производится их обработка.

Для измерения энергосиловых параметров кольцевые месдозы были установлены под нажимные винты и гидроцилиндр, подключены к регистрирующей аппаратуре. Для измерения усилия на матрице и нажимных винтах применяли датчики силы CWW-50tf и CWW-100tf фирмы DacellCo. LTD с максимально допустимым усилием сжатия 500 кН и 1 МН соответственно.

Полученные прутки диаметром 9 и 5 мм подвергали холодному волочению до диаметра 2 мм. Волочение производили на цепном волочильном стане однократного действия (рис. 1). Технические характеристики волочильного стана приведены в табл. 3. Маршрут волочения для прутков диаметром 9 мм составлял: 9,0–8,5–7,0–6,5–5,9–5,4–5,0–4,5–4,0–3,6–3,0–2,8–2,48–2,2–2,0 мм. Маршрут волочения для прутков диаметром 5 мм составлял: 5,0–4,5–4,2–4,0–3,6–3,3–3,0–2,8–2,48–2,2–2,0 мм.



Рис. 1. Цепной волочильный стан однократного действия

Fig. 1. A single chain drawbench

Таблица 3. Технические характеристики волочильного стана

Table 3. Specifications of the drawbench

Характеристики	Значения характеристик
Длина волочения, мм	2000
Количество ниток, шт.	1
Сила волочения, кН	50
Скорость волочения, м/с	0,17
Потребляемая мощность, кВт	25
Габаритные размеры, мм	3000×1800×1300

Суммарная степень деформации ϵ_{Σ} при холодном волочении прутков рассчитывалась по формуле

$$\epsilon_{\Sigma} = \frac{F_0 - F_i}{F_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения исходной заготовки для волочения (пруток); F_i – площадь поперечного сечения проволоки в i -м проходе.

Механические свойства определяли на оборудовании Walter + Bai AG LFM 400 кН и LFM 20 кН (Walter + Bai AG, Швейцария) в соответствии с ГОСТ 1497-84.

Удельное электрическое сопротивление ρ измеряли на образцах длиной 1 м с помощью омметра «Виток» по ГОСТ 7229-76.

Полученные результаты и их обсуждение

Для измерения энергосиловых параметров кольцевые месдозы были установлены под нажимные винты валков и гидроцилиндр матрицы и подключены к регистрирующей аппаратуре. Результаты измерений усилий представлены в табл. 4 и 5.

Усилия на валках не превышают 323 кН для процесса СПП и 279 кН для процесса СЛиПП. Усилия на матрице не превышают 206 кН для процесса СПП и 171 кН для процесса СЛиПП.

Следует отметить, что для получения проволоки не потребовалось ни одного промежуточного отжига. Для сравнения между собой механических свойств полученной проволоки были построены графики зависимости измеряемых величин от степени деформации (рис. 2-7).

Таблица 4. Результаты исследований энергосиловых параметров сплава Al+1% РЗМ по методу СЛиПП

Table 4. Studies on force parameters of Al+1% REM alloy according to the CCRE method

Параметры		$T = 750^{\circ}\text{C}$		$T = 780^{\circ}\text{C}$	
		$\varnothing 9 \text{ мм}$	$\varnothing 5 \text{ мм}$	$\varnothing 9 \text{ мм}$	$\varnothing 5 \text{ мм}$
$\xi = 0,74 \text{ с}^{-1}$ (4 об/мин)	$P_{\text{вал.}}$, кН	–	279	–	230
	$P_{\text{матр.}}$, кН	–	155	–	145
$\xi = 1,49 \text{ с}^{-1}$ (8 об/мин)	$P_{\text{вал.}}$, кН	208	270	190	223
	$P_{\text{матр.}}$, кН	146	171	127	150

Таблица 5. Результаты исследований энергосиловых параметров сплава Al+1% РЗМ по методу СПП

Table 5. Studies on force parameters of Al+1% REM alloy according to the CRE method

Параметры		$T = 550^{\circ}\text{C}$		$T = 480^{\circ}\text{C}$	
		$\varnothing 9 \text{ мм}$	$\varnothing 5 \text{ мм}$	$\varnothing 9 \text{ мм}$	$\varnothing 5 \text{ мм}$
$\xi = 0,74 \text{ с}^{-1}$ (4 об/мин)	$P_{\text{вал.}}$, кН	235	255	294	323
	$P_{\text{матр.}}$, кН	127	176	167	206
$\xi = 1,49 \text{ с}^{-1}$ (8 об/мин)	$P_{\text{вал.}}$, кН	216	215	274	287
	$P_{\text{матр.}}$, кН	107	137	137	176

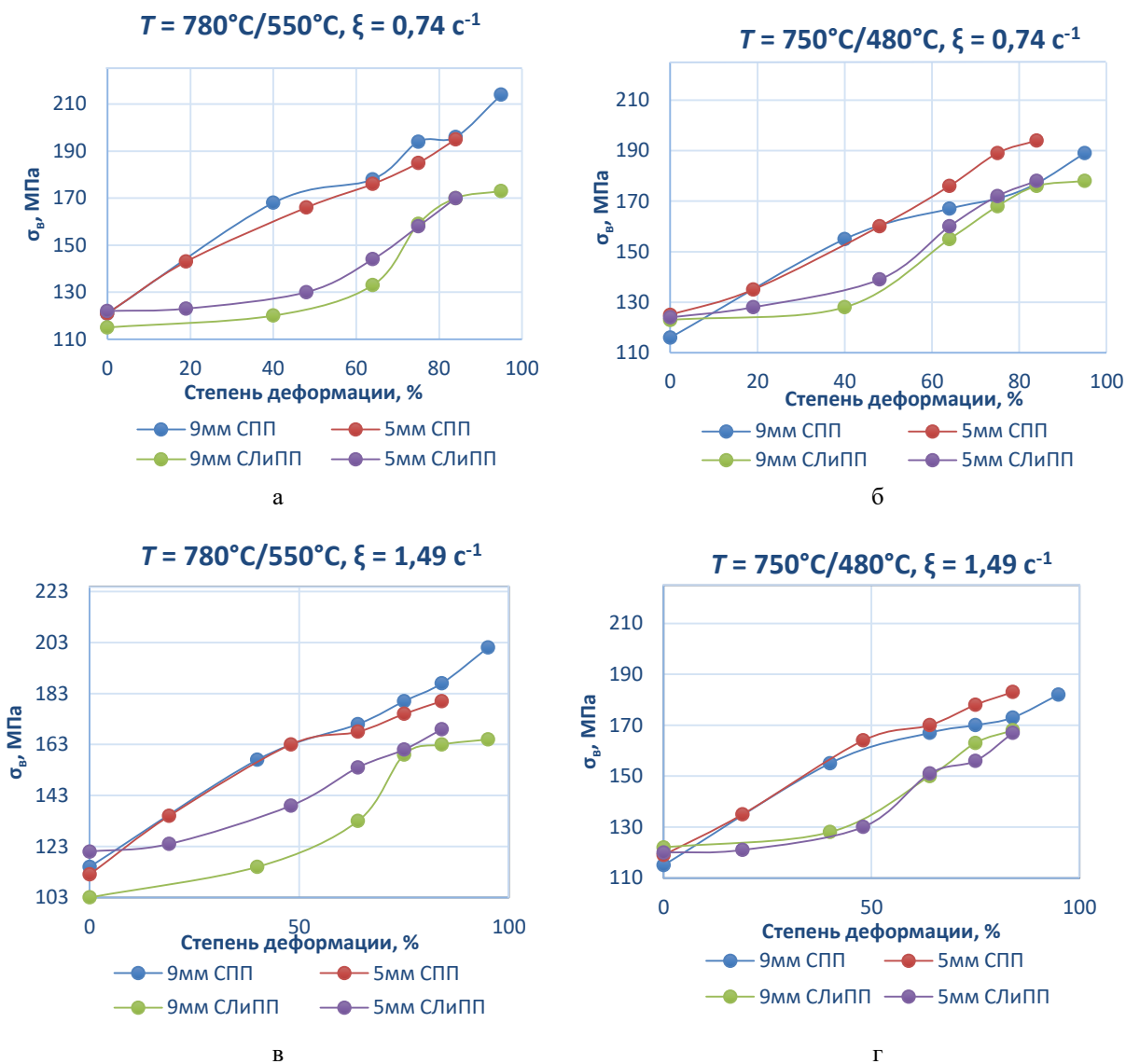


Рис. 2. Прочностные свойства прутков из сплава Al-1%РЗМ (сравнение по коэффициенту вытяжки)
 Fig. 2. Strength properties of rods from Al-1% REM alloy (compared by the coefficient of elongation)

Как видно из рис. 2, наибольшей прочностью обладают прутки при режиме СПП при $T = 550^{\circ}\text{C}$ и скорости равной $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ (рис. 2, а), а при СЛПП максимальные показатели прочности

наблюдаются на рис. 2, б. Колебания значения $\sigma_{\text{в}}$ в зависимости от режима получения полуфабриката составляют 10-40 МПа.

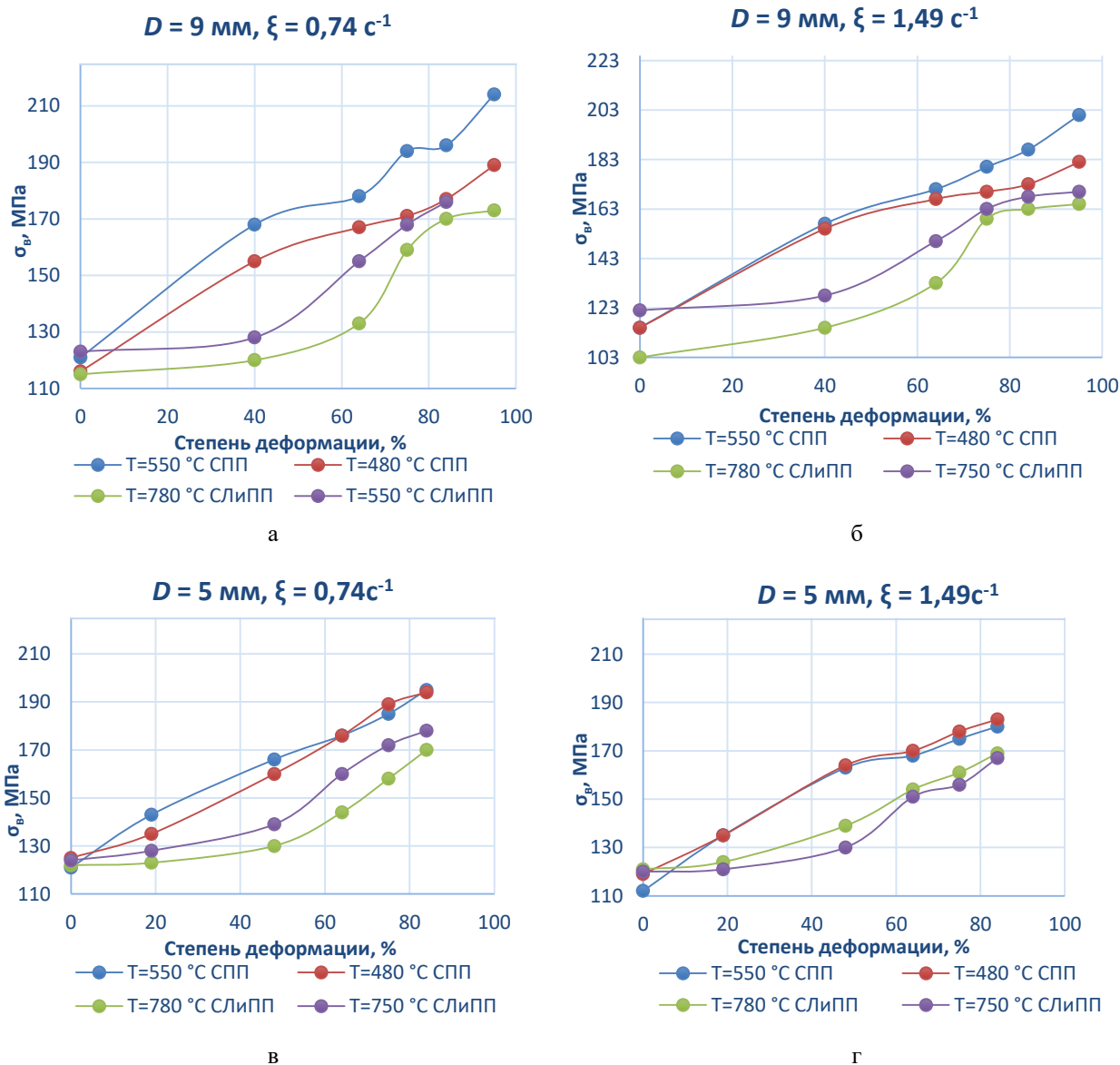


Рис. 3. Прочностные свойства прутков из сплава Al-1%РЗМ (сравнение по температуре)
 Fig. 3. Strength properties of rods from Al-1% REM alloy (compared by temperature)

Как видно из рис. 3, наибольшей прочностью обладают режимы обработки при $T = 550^\circ\text{C}$ и скорость равной $\xi = 0,74 \text{ с}^{-1}$ (рис. 3, а). Температура оказывает влияние на режимы СПП: диаметр

получаемого прутка 9 мм и обоими скоростями, а вот при диаметре 5 мм конечные точки влияния температуры незначительно отличаются.

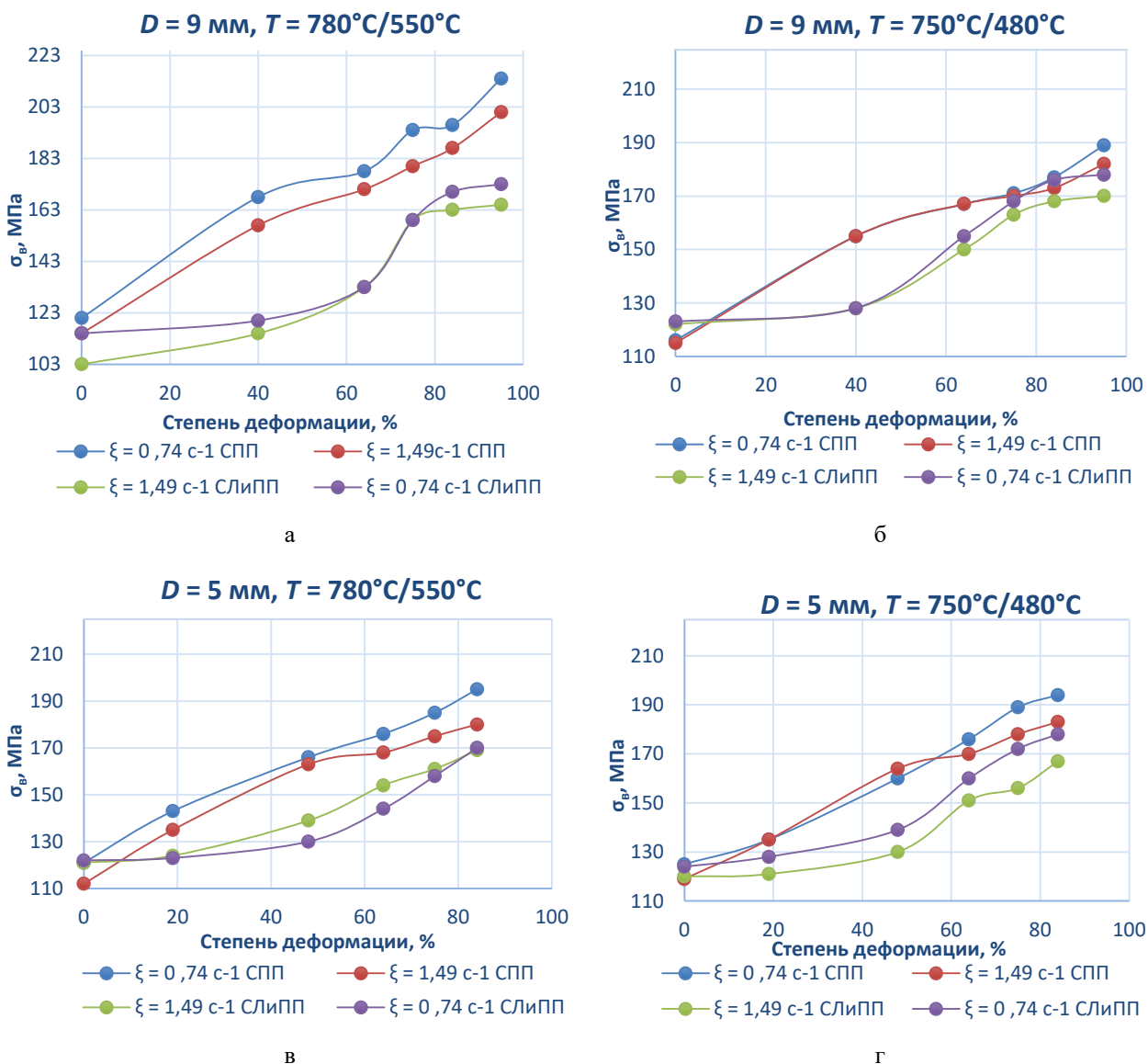


Рис. 4. Прочностные свойства прутков из сплава Al-0,5%РЗМ (сравнение по скорости деформации)
 Fig. 4. Strength properties of rods from Al-0.5% REM alloy (compared by the strain rate)

Как видно из **рис. 4**, наибольшую разницу по значениям прочности между СПП и СЛиПП можно наблюдать на **рис. 4, а**. В результате холодного волочения происходит так называемый

«наклеп» металла, то есть его упрочнение. Скорость деформации оказывает незначительное влияние на временное сопротивление разрыву (колебания значения σ_b составляют 1-10 МПа).

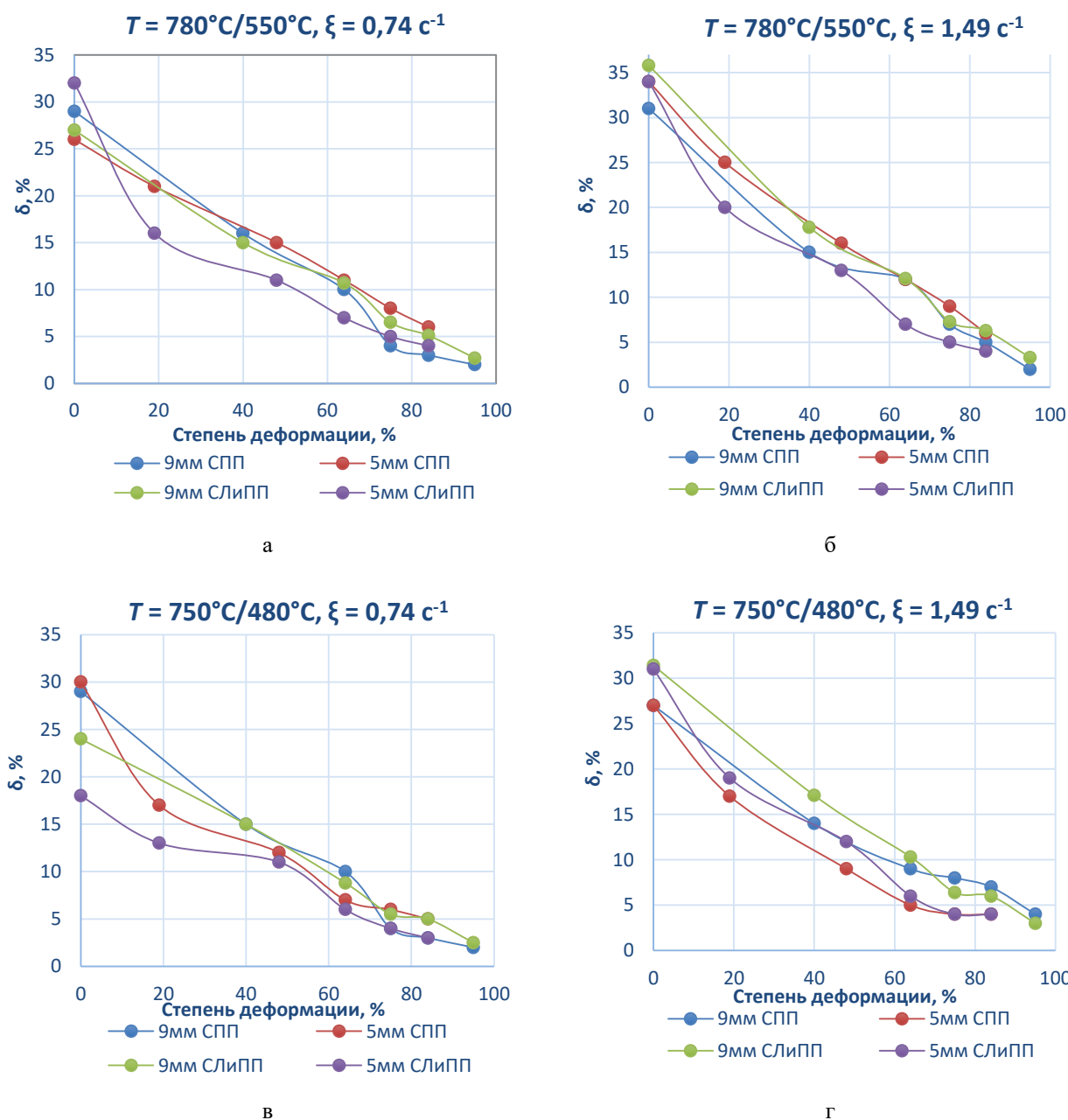


Рис. 5. Пластические свойства прутков из сплава Al-0,5%РЗМ (сравнение по коэффициенту вытяжки)
 Fig. 5. Plastic properties of rods from Al-0.5% REM alloy (compared by the coefficient of elongation)

Как видно из **рис. 5**, наибольшей пластичностью обладают прутки при режиме обработки при $T = 780^{\circ}\text{C}$ (СЛиПП) и $T = 550^{\circ}\text{C}$ (СПП), скорость $\xi = 1,49 \text{ c}^{-1}$ (**рис. 5, б**). Однако хорошей пластичностью также обладают прутки при режиме обра-

ботки при $T = 780^{\circ}\text{C}$ (СЛиПП) и $T = 550^{\circ}\text{C}$ (СПП) и скорость $\xi = 0,74 \text{ c}^{-1}$ (**рис. 5, а**). При сравнении можно сделать вывод, что они практически схожи по свойствам.

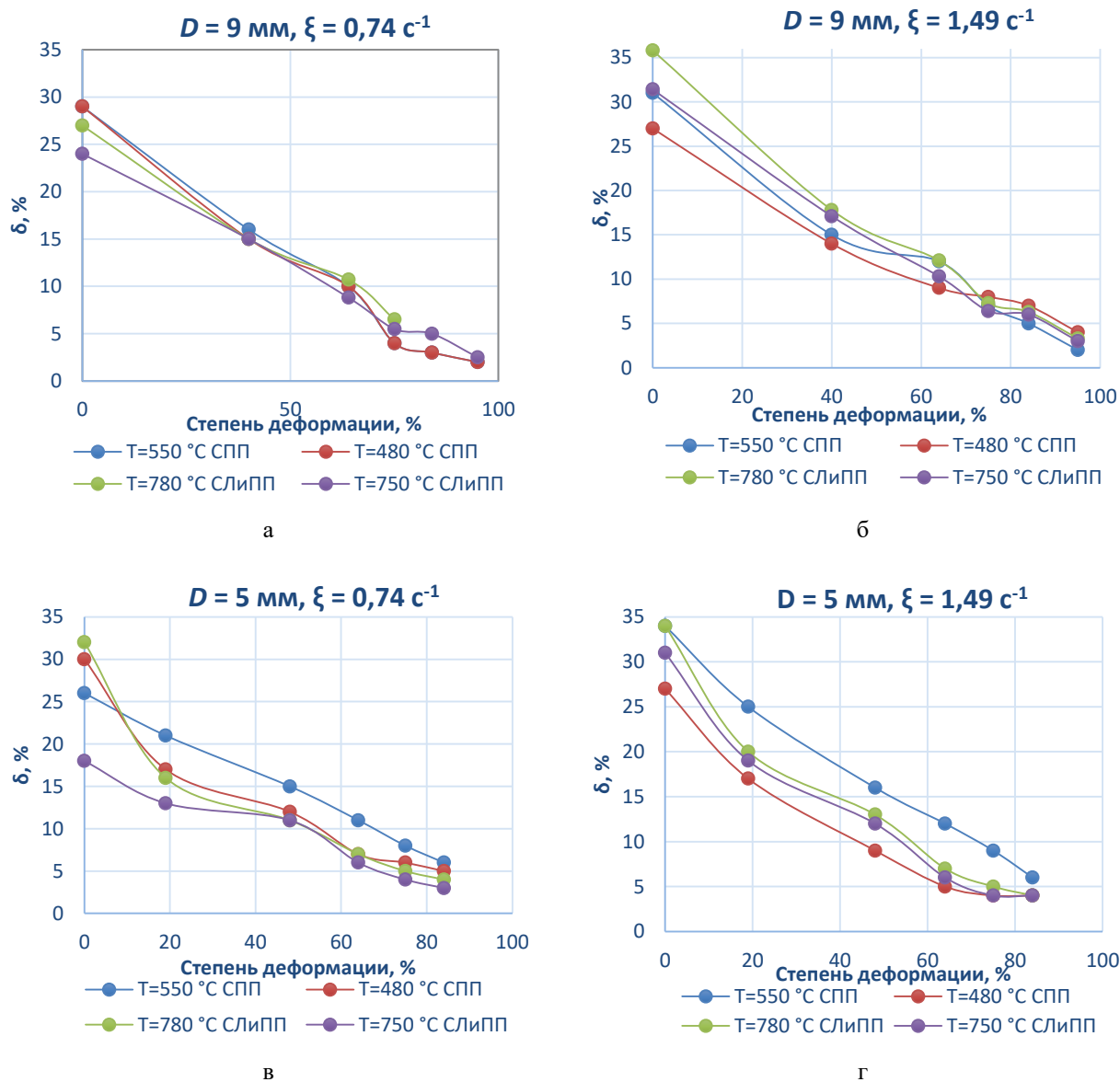


Рис. 6. Пластические свойства прутков из сплава Al-0,5%РЗМ (сравнение по температуре)
 Fig. 6. Plastic properties of rods from Al-0.5% REM alloy (compared by temperature)

Как видно из **рис. 6**, наибольшей пластичностью обладают прутки при режиме обработки при $T = 780^\circ\text{C}$ (СЛиПП) и диаметре прутка 9 мм при скорости $\xi = 1,49 \text{ с}^{-1}$ (**рис. 6, б**), высокая пла-

стичность также получается при $T = 550^\circ\text{C}$, диаметре 5 мм и скорости обработки $\xi = 1,49 \text{ с}^{-1}$ (**рис. 6, г**).

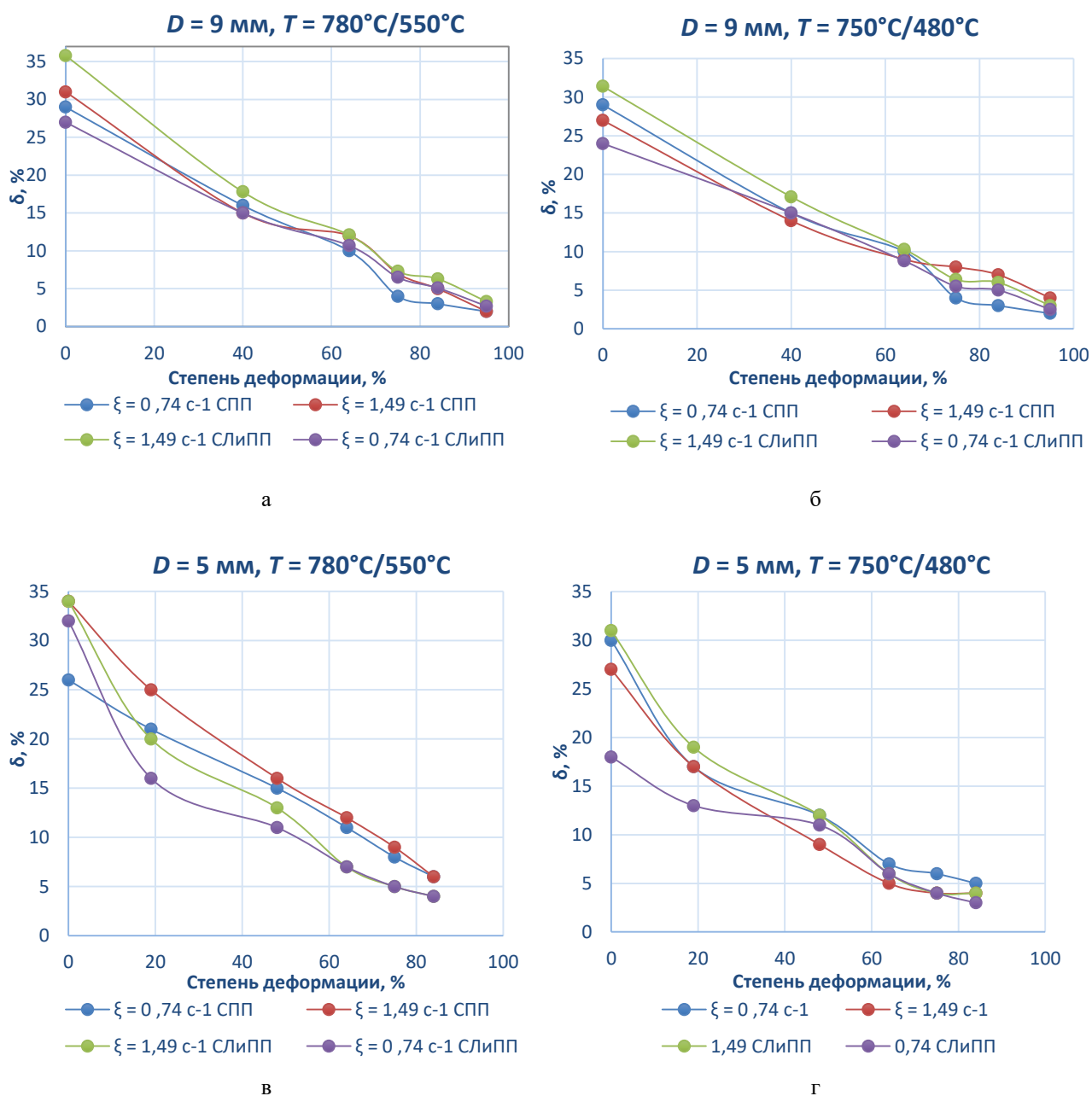


Рис. 7. Пластические свойства прутков из сплава Al-0,5%РЗМ (сравнение по скорости деформации)
 Fig. 7. Plastic properties of rods from Al-0.5% REM alloy (compared by the strain rate)

Как видно из рис. 7, наибольшей пластичностью обладают прутки при режиме обработки при $T = 780^\circ\text{C}$ (СЛиПП) и диаметре прутка 9 мм (рис. 7, а). Скорость деформации оказывает су-

щественное влияние только на начальных этапах получения прутков (колебания значения δ составляют 10-15% (рис. 7, б-г).

Следующим этапом было измерение электросопротивления прутков диаметром 9 и 5 мм и проволоки диаметром 2 мм согласно методике по ГОСТ 7229-76 с помощью омметра «Виток». Результаты замеров электросопротивления деформированных полуфабрикатов в зависимости от режимов обработки представлены в табл. 6.

Значения удельного электросопротивления варьировались от 0,02614 до 0,03413 Ом·мм²/м для прутков и от 0,02759 до 0,03059 Ом·мм²/м для проволоки диаметром 2 мм в зависимости от режимов обработки.

Заключение

Основные результаты исследования следующие:

1. Выполнены экспериментальные исследования по реализации процессов СЛиПП и СПП на экспериментальном сплаве системы Al-1% РЗМ при варьировании температуры обработки, скорости и степени деформации.

2. Проведен анализ силовых параметров процессов СЛиПП и СПП. Усилия на валках и

матрице ниже у процесса СЛиПП, что соответствует общепринятым законам ОМД. Усилия на валках не превышают 323 кН для процесса СПП и 279 кН для процесса СЛиПП. Усилия на матрице не превышают 206 кН для процесса СПП и 171 кН для процесса СЛиПП.

3. Проведена оценка зависимости механических свойств и представлены графические зависимости для деформированных полуфабрикатов, полученных методами СЛиПП и СПП, от варьируемых факторов в сравнении по температуре, коэффициенту вытяжки и скорости деформации. Следует отметить, что для получения проволоки диаметром 2 мм не потребовалось ни одного промежуточного отжига.

4. Исследованы значения удельного электрического сопротивления полученных методами СПП и СЛиПП прутков и проволоки из них. Значения удельного электросопротивления не превышают 0,03413 Ом·мм²/м для прутков и от 0,03059 Ом·мм²/м для проволоки диаметром 2 мм в зависимости от режимов обработки.

Таблица 6. Результаты измерения электросопротивления прутков и проволоки из сплава Al-1%РЗМ
Table 6. Measured electrical resistance of rods and wire from Al-1% REM alloy

Параметры		$T_{распл} = 750^{\circ}C / T_{заг} = 480^{\circ}C$				
		Ø, мм	9	2	5	2
		ϵ_{Σ} , %	0	95	0	84
ρ , Ом·мм ² /м	$\xi = 0,74 \text{ с}^{-1}$ (4 об/мин)	СЛиПП	0,02614	0,02812	0,02835	0,02908
		СПП	0,03224	0,02788	0,02829	0,02896
	$\xi = 1,49 \text{ с}^{-1}$ (8 об/мин)	СЛиПП	0,02659	0,0304	0,02838	0,02926
		СПП	0,03413	0,02807	0,02949	0,02789
Параметры		$T_{распл} = 780^{\circ}C / T_{заг} = 550^{\circ}C$				
		Ø, мм	9	2	5	2
		ϵ_{Σ} , %	0	95	0	84
ρ , Ом·мм ² /м	$\xi = 0,74 \text{ с}^{-1}$ (4 об/мин)	СЛиПП	0,02536	0,02858	0,0285	0,02933
		СПП	0,03154	0,02798	0,02776	0,02842
	$\xi = 1,49 \text{ с}^{-1}$ (8 об/мин)	СЛиПП	0,02602	0,03059	0,02854	0,02916
		СПП	0,03296	0,02759	0,02909	0,02761

Список источников

1. Czerwinski F. Cerium in aluminum alloys. *Journal of Materials Science*, 2020, vol. 55, no. 1, pp. 24-72. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03892-z>
2. Tukker A. Rare earth elements supply restrictions: Market failures, not scarcity, hamper their current use in high-tech applications. *Environ. Sci. Technol.*, 2014, no. 48, pp. 9973-9974. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es503548f>
3. Мировой рынок алюминия: тенденции развития, перспективы и ключевые проблемы / Чернавина Д.А., Чернавин Е.А., Фаллер А.В. и др. // Молодой ученый. 2018. №17. С. 206-210. <https://moluch.ru/archive/203/49838/>
4. Белый Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий // Кабели и Провода. 2012. №1. С. 8-15.
5. Czerwinski F., Amirkhiz B.S. On the Al-Al11Ce3 eutectic transformation in aluminum-cerium binary alloys. *Materials*, 2020, vol. 13, no. 20, p. 4549. <https://doi.org/10.3390/ma13204549>
6. Czerwinski F. Critical Assessment 36: Assessing differences between the use of cerium and scandium in aluminium alloying. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 2020, vol. 36, no. 3, pp. 255-263. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02670836.2019.1702775>
7. Belov N.A., Korotkova N.O., Akopyan T.K., Timofeev V.N. Structure and Properties of Al-0.6%Zr-0.4%Fe-0.4%Si (wt.%) Wire Alloy Manufactured by Electromagnetic Casting. 2020, vol. 72, no. 4, pp. 1561-1570. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03875-0>
8. Liao H., Liu Y., Lü C., Wang Q. Mechanisms for Ce-induced remarkable improvement of conductivity in Al alloys. *Journal of Materials Research*, 2017, vol. 32, no. 3, pp. 566-574. <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-materials-research/article/abs/mechanisms-for-ceinduced-remarkable-improvement-of-conductivity-in-al-alloys/9DD686C179F53B383C0A1E17B2527FB4#>
9. Shi Z.M., Gao K., Shi Y.T., Wang Y. Microstructure and mechanical properties of rare-earth-modified Al-1Fe binary alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, no. 632, pp. 62-71. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509315001963>
10. Zhang Meng, Wang Haoyu, Han Wei, Zhang Milin, Li Yunna, Wang Yanli, Xue Yun, Ma Fuqiu, Zhang Xingmei. Electrochemical extraction of cerium and formation of Al-Ce alloy from CeO₂ assisted by AlCl₃ in LiCl-KCl melts. *Sci China Chem*, 2014, vol. 57, no. 11, pp. 1477-1482. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11426-014-5214-8>
11. Mogucheva A., Zyabkin D., Kaibyshev R. Effect of the thermomechanical processing on microstructure and properties of an Al-Ce alloy. *Materials Science Forum*, 2012, no. 706-709, pp. 361-366. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.361>
12. Belov N.A., Alabin A.N., Teleuova A.R. Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wires. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 53, no. 9-10, pp. 455-459. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11041-012-9415-5>
13. Zhang Yu., Wei F., Mao J., Niu G. The difference of La and Ce as additives of electrical conductivity aluminum alloys. *Materials Characterization*, 2019, no. 158, p. 109963. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580319312847?via%3Dihub>
14. Zhu R., Su Y., Qin X., Hu N., Lu L. Effect of rare earth elements on the microstructure and properties of a die-cast aluminum alloy. *Materialpruefung / Materials Testing*, 2019, vol. 61, no. 2, pp. 159-163. <https://doi.org/10.3139/120.111299>
15. He Ya., Liu J., Qiu Sh., Deng Zh., Zhang J., Shen Ya. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-La alloys with varying La contents. *Mater. Sci. Eng. A*, 2017, no. 701, pp. 134-142. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509317307876>
16. Yang Q., Bu F.Q., Meng F.C., Qiu X., Zhang D.P., Zheng T., Liu X.J., Meng J. The improved effects by the combinative addition of lanthanum and samarium on the microstructures and the tensile properties of high-pressure die-cast Mg-4Al-based alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 2015, no. 628, pp. 319-326. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509315000660>
17. Jiang W., Fan Z., Dai Y., Li C. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy. *Mater. Sci. Eng. A*, 2014, no. 597, pp. 237-244. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509314000264>
18. Huang X., Yan H. Effect of trace La addition on the microstructure and mechanical property of as-cast ADC12 Al-Alloy. *J. Wuhan Univ. Technol.-Materials Sci. Ed.*, 2013, no. 28, pp. 202-205.
19. Ye W., Yan X., Zhang X., Liu E., Liu C., Di C., Miao Y. Effects of Trace Cerium on As-cast Microstructure and Electrical Conductivity of Industrial Pure Aluminum. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin / Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2019, vol. 39, no. 10, pp. 1149-1151. DOI: 10.15980/j.tzzz.2019.10.027
20. Sidelnikov S.B., Galiev R.I., Bersenev A.S., Voroshilov D.S. Application and Research Twin Roll Casting-Extruding Process for Production Longish Deformed Semi-Finished Products from Aluminum Alloys. *Materials Science Forum*, 2018, no. 918, pp. 13-20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.918.13>
21. Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Загиров Н.Н. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография. М.: МАКС Пресс, 2005. 344 с.
22. Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Motkov M.M., Timofeev V.N., Konstantinov I.L., Dovzhenko N.N., Lopatina E.S., Bepalov V.M., Sokolov R.E., Mansurov Yu.N., Voroshilova M.V. Investigation structure and properties of wire from the alloy of Al-REM system obtained with the application of casting in the

- electromagnetic mold, combined rolling-extruding, and drawing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, no. 114, pp. 2633-2649. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07054-x>
23. Sidelnikov S., Voroshilov D., Motkov M., Bepalov V., Voroshilova M. Experimental and analytical assessment of the power parameters of the combined rolling-extruding process using a round billet from alloy 01417 obtained using an electromagnetic mold. *Key Engineering Materials*, 2021, no. 887, pp. 300-305. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.300>
 24. Sidelnikov S., Voroshilov D., Motkov M., Voroshilova M., Bepalov V. Development of Combined Machining Modes, Investigation of Mechanical Properties and Structure of Deformed Semi-Finished Products from Alloy 01417. *Materials Science Forum*, 2020, no. 992, pp. 498-503. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.498>
 25. Sidelnikov S., Sokolov R., Voroshilov D., Motkov M., Bepalov V., Voroshilova M., Sokolova S., Rudnitskiy E., Lebedeva O., Borisyuk V. Modeling the Process of Obtaining Bars from Aluminum Alloy 01417 by Combined Rolling-Extruding Method with Application of the Deform-3D Complex. *Key Engineering Materials*, 2020, no. 861, pp. 540-546. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.861.540>
 26. Разработка и исследование технологии получения проволоки из сплава Al-РЗМ с применением совмещенной обработки / Сидельников С.Б., Ворошилов Д.С., Первухин М.В. и др. // Цветные металлы. 2019. №9. С. 63-68. <https://www.rudmet.ru/journal/1853/article/31547/>
- <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02670836.2019.1702775>
7. Belov N.A., Korotkova N.O., Akopyan T.K., Timofeev V.N. Structure and properties of Al-0.6%Zr-0.4%Fe-0.4%Si (wt.%) wire alloy manufactured by electromagnetic casting. *JOM*. 2020;72(4):1561-1570. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03875-0>
 8. Liao H., Liu Y., Lü C., Wang Q. Mechanisms for Ce-induced remarkable improvement of conductivity in Al alloys. *Journal of Materials Research*. 2017;32(3):566-574. <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-materials-research/article/abs/mechanisms-for-ce-induced-remarkable-improvement-of-conductivity-in-al-alloys/9DD686C179F53B383C0A1E17B2527FB4#>
 9. Shi Z.M., Gao K., Shi Y.T., Wang Y. Microstructure and mechanical properties of rare-earth-modified Al-1Fe binary alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2017;(632):62-71. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509315001963>
 10. Zhang Meng, Wang Haoyu, Han Wei, Zhang Milin, Li Yunna, Wang Yanli, Xue Yun, Ma Fuqiu, Zhang Xingmei. Electrochemical extraction of cerium and formation of Al-Ce alloy from CeO₂ assisted by AlCl₃ in LiCl-KCl melts. *Sci. China Chem*. 2014;57(11):1477-1482. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11426-014-5214-8>
 11. Mogucheva A., Zybakin D., Kaibyshev R. Effect of the thermomechanical processing on microstructure and properties of an Al-Ce alloy. *Materials Science Forum*. 2012;(706-709):361-366. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.361>
 12. Belov N.A., Alabin A.N., Teleuova A.R. Comparative analysis of alloying additives as applied to the production of heat-resistant aluminum-base wires. *Metal Science and Heat Treatment*. 2012;53(9-10):455-459. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11041-012-9415-5>
 13. Zhang Yu., Wei F., Mao J., Niu G. The difference of La and Ce as additives of electrical conductivity aluminum alloys. *Materials Characterization*. 2019;(158):109963. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1044580319312847?via%3DIihub>
 14. Zhu R., Su Y., Qin X., Hu N., Lu L. Effect of rare earth elements on the microstructure and properties of a die-cast aluminum alloy. *Materialpruefung / Materials Testing*. 2019;61(2):159-163. <https://doi.org/10.3139/120.111299>
 15. He Ya., Liu J., Qiu Sh., Deng Zh., Zhang J., Shen Ya. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-La alloys with varying La contents. *Mater. Sci. Eng. A*. 2017;(701):134-142. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509317307876>
 16. Yang Q., Bu F.Q., Meng F.C., Qiu X., Zhang D.P., Zheng T., Liu X.J., Meng J. The improved effects by the combinative addition of lanthanum and samarium on the microstructures and the tensile properties of high-pressure die-cast Mg-4Al-based alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2015;(628):319-326. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509315000660>

References

1. Czerwinski F. Cerium in aluminum alloys. *Journal of Materials Science*. 2020;55(1):24-72. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03892-z>
2. Tukker A. Rare earth elements supply restrictions: Market failures, not scarcity, hamper their current use in high-tech applications. *Environ. Sci. Technol*. 2014;(48):9973-9974. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es503548f>
3. Chernavina D.A., Chernavin E.A., Faller A.V. et al. The global aluminum market: development trends, prospects and key problems. *Molodoy ucheny* [Young Scientist]. 2018;(17):206-210. <https://moluch.ru/archive/203/49838/> (In Russ.)
4. Belyi D.I. Aluminum alloys for current-carrying conductors of cable products. *Kabeli i provoda* [Cables and Wires]. 2012;(1):8-15. (In Russ.)
5. Czerwinski F., Amirkhiz B.S. On the Al-Al₁₁Ce₃ eutectic transformation in aluminum-cerium binary alloys. *Materials*. 2020;13(20):4549. <https://doi.org/10.3390/ma13204549>
6. Czerwinski F. Critical Assessment 36: Assessing differences between the use of cerium and scandium in aluminium alloying. *Materials Science and Technology* (United Kingdom). 2020;36(3):255-263.

17. Jiang W., Fan Z., Dai Y., Li C. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy. *Mater. Sci. Eng. A*. 2014;(597):237-244. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509314000264>
18. Huang X., Yan H. Effect of trace La addition on the microstructure and mechanical property of as-cast ADC12 Al-Alloy. *J. Wuhan Univ. Technol.-Materials Sci. Ed.* 2013;(28):202-205.
19. Ye W., Yan X., Zhang X., Liu E., Liu C., Di C., Miao Y. Effects of trace cerium on as-cast microstructure and electrical conductivity of industrial pure aluminum. *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys*. 2019;39(10):1149-1151. DOI: 10.15980/j.tzzz.2019.10.027.
20. Sidelnikov S.B., Galiev R.I., Bersenev A.S., Voroshilov D.S. Application and research twin roll casting-extruding process for production longish deformed semi-finished products from aluminum alloys. *Materials Science Forum*. 2018;(918):13-20. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.918.13>
21. Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., Zagirov N.N. *Kombinirovannye i sovmeshchennye metody obrabotki tsvetnykh metallov i splavov: monografiya* [Combined and integrated methods of processing non-ferrous metals and alloys: monograph]. Moscow: MAKS Press, 2005, 344 p. (In Russ.)
22. Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Motkov M.M., Timofeev V.N., Konstantinov I.L., Dovzhenko N.N., Lopatina E.S., Bespalov V.M., Sokolov R.E., Mansurov Yu.N., Voroshilova M.V. Investigation structure and properties of wire from the alloy of Al-REM system obtained with the application of casting in the electromagnetic mold, combined rolling-extruding, and drawing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;(114):2633-2649. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07054-x>
23. Sidelnikov S., Voroshilov D., Motkov M., Bespalov V., Voroshilova M. Experimental and analytical assessment of the power parameters of the combined rolling-extruding process using a round billet from alloy 01417 obtained using an electromagnetic mold. *Key Engineering Materials*. 2021;(887):300-305. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.300>
24. Sidelnikov S., Voroshilov D., Motkov M., Voroshilova M., Bespalov V. Development of combined machining modes, investigation of mechanical properties and structure of deformed semi-finished products from alloy 01417. *Materials Science Forum*. 2020;(992):498-503. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.992.498>
25. Sidelnikov S., Sokolov R., Voroshilov D., Motkov M., Bespalov V., Voroshilova M., Sokolova S., Rudnitskiy E., Lebedeva O., Borisyuk V. Modeling the process of obtaining bars from aluminum alloy 01417 by combined rolling-extruding method with application of the Deform-3D complex. *Key Engineering Materials*. 2020;(861):540-546. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.861.540>
26. Sidelnikov S.B., Voroshilov D.S., Pervukhin M.V. et al. Development and research of technology for producing electrotechnical wire from alloys of the Al – REM system, obtained with the application of combined machining methods. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2019;(9):63-68. <https://www.rudmet.ru/journal/1853/article/31547/> (In Russ.)

Поступила 09.06.2023; принята к публикации 05.07.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 09/06/2023; revised 05/07/2023; published 25/09/2023

Ворошилов Денис Сергеевич – кандидат технических наук, заведующий кафедрой ОМД, старший научный сотрудник лаборатории физикохимии металлургических процессов и материалов, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: d.s.voroshilov@gmail.com. ORCID 0000-0002-1406-3665

Лебедева Ольга Сергеевна – кандидат технических наук, доцент кафедры ОМД, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: lebedewa-olya@mail.ru.

Беспалова Диана Дмитриевна – инженер-исследователь лаборатории низкоуглеродной металлургии и энергетики, магистрант кафедры ОМД, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: dianarechkunova@mail.ru.

Дурнопьянова Анастасия Сергеевна – магистрант кафедры ОМД, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: a.durnopyanov@yandex.ru.

Бернгардт Виктор Александрович – аспирант кафедры ОМД, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия; инженер-исследователь ООО «РУСАЛ ИТЦ», Красноярск, Россия.
Email: berngardt19@mail.ru. ORCID 0009-0005-9747-5241

Ворошилова Марина Владимировна – старший преподаватель кафедры ОМД, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: aniram1988@yandex.ru. ORCID 0000-0001-9411-0662

Denis S. Voroshilov – PhD (Eng.), Head of the Metal Forming Department, Senior Researcher of the Laboratory of Physical Chemistry of Metallurgical Processes and Materials, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: d.s.voroshilov@gmail.com. ORCID 0000-0002-1406-3665

Olga S. Lebedeva – PhD (Eng.), Associate Professor of the Metal Forming Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: lebedewa-olya@mail.ru.

Diana D. Bespalova – Research Engineer of the Laboratory of Low-Carbon Metallurgy and Power Industry, master’s student of the Metal Forming Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: dianarechkunova@mail.ru.

Anastasiya S. Durnopyanova – master’s student of the Metal Forming Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: a.durnopyanov@yandex.ru.

Viktor A. Berngardt – postgraduate student of the Metal Forming Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Research Engineer of LLC RUSAL ETC, Krasnoyarsk, Russia.
Email: berngardt19@mail.ru. ORCID 0009-0005-9747-5241

Marina V. Voroshilova – Senior Lecturer of the Metal Forming Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: aniram1988@yandex.ru. ORCID 0000-0001-9411-0662