

РАЗРАБОТКА, МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВОГО СПЛАВА С НИЗКИМ СОДЕРЖАНИЕМ СКАНДИЯ

© 2019 г. С.Б. Сидельников, О.В. Якивчук, В.Н. Баранов, Е.Ю. Зенкин, И.Н. Довженко

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

ОАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод»

Статья поступила в редакцию 14.05.19 г., доработана 19.07.19 г., подписана в печать 26.09.19 г.

Приведены результаты исследований технологии получения длинномерных деформированных полуфабрикатов методами листовой прокатки и бесслитковой прокатки—прессования из алюминий-магниевого сплава с низким содержанием скандия. В ходе работы были применены методы компьютерного и физического моделирования, а полученные результаты проверены путем опытно-промышленных испытаний. Выбор данных материалов в качестве объектов исследования обусловлен тем, что алюминиевые сплавы системы Al–Mg, легированные скандием, наряду с высокой прочностью имеют повышенную стойкость к коррозии. В связи с этим в настоящей работе была поставлена задача получения длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде листового проката, прутков и сварочной проволоки из экономнолегированного Al–Mg-сплава. Для компьютерного моделирования был применен программный комплекс DEFORM-3D, с помощью которого определяли рациональные условия горячей прокатки крупногабаритных слитков и режимы деформации процесса совмещенной обработки по методу бесслитковой прокатки—прессования прутков из исследуемого сплава. Установлены и обоснованы технологические и силовые параметры этих процессов и закономерности их изменения. Полученные экспериментальные результаты позволили при физическом моделировании изучаемых процессов выявить предельные значения силовых параметров, а также изучить структуру и свойства деформированных, отожженных и сварных полуфабрикатов из исследуемого сплава. Кроме того, были определены свойства металла в достаточно широком диапазоне изменения температурно-скоростных и деформационных параметров. На основании результатов экспериментальных исследований и моделирования даны рекомендации для промышленного освоения технологии горячей прокатки слитков большой толщины из алюминий-магневых сплавов. При этом разработаны технологические решения, регламенты и условия на деформированные полуфабрикаты из исследуемого сплава и получены партии листового проката с требуемым уровнем механических и коррозионных свойств.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, скандий, горячая прокатка, совмещенные процессы, механические свойства, коррозионные свойства, структура.

Сидельников С.Б. — докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой обработки металлов давлением (ОМД) Института цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) Сибирского федерального университета (СФУ) (660025, г. Красноярск, пр-т им. газеты «Красноярский рабочий», 95). E-mail: sbs270359@yandex.ru.

Якивчук О.В. — канд. техн. наук, ассистент кафедры ОМД ИЦМиМ СФУ. E-mail: yakivchuk.olga@yandex.ru.

Баранов В.Н. — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой общей металлургии ИЦМиМ СФУ.

Зенкин Е.Ю. — управляющий директор ОАО «РУСАЛ Братский алюминиевый завод».

Довженко И.Н. — канд. техн. наук, доцент кафедры ОМД ИЦМиМ СФУ.

Для цитирования: Сидельников С.Б., Якивчук О.В., Баранов В.Н., Зенкин Е.Ю., Довженко И.Н. Разработка, моделирование и исследование технологии получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминий-магневых сплавов с низким содержанием скандия. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 6. С. 51–59.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-6-51-59.

Sidelnikov S.B., Yakivchuk O.V., Baranov V.N., Zenkin E.Yu., Dovzhenko I.N.

Development, modeling and research of technology for producing longish deformed semi-finished products from aluminum-magnesium alloys with low scandium contents

The paper provides the results of studying the technology for producing longish deformed semi-finished products by sheet rolling and direct rolling-extruding of aluminum-magnesium alloys with different scandium contents. Computer and physical modeling methods were used for the research and the results were verified by pilot tests. These alloys were selected for the research due to the

fact that Al–Mg aluminum alloys doped with scandium have increased corrosion resistance along with their high strength. In this regard, this research was aimed to obtain longish deformed semi-finished products in the form of sheet metal, rods and welding wire from economically alloyed Al–Mg alloys. Computer simulation was performed using the DEFORM-3D software package to determine rational conditions of hot rolling of large-sized ingots and deformation modes of the combined processing using the method of direct rolling-extruding of rods made of the investigated alloys. At the same time, the technological and force parameters of these processes were justified with the laws of their change presented. Experimental results obtained made it possible to determine the limit values of force parameters and to study the structure and properties of deformed, annealed and welded semi-finished products made of the investigated alloys during the physical modeling of processes studied. In addition, metal properties were determined in a fairly wide range of changes in temperature, speed, and deformation parameters. Based on the results of experimental studies and modeling, recommendations were given for the industrial development of the technology for hot rolling of thick ingots from the investigated alloys. At the same time, technological solutions, regulations and conditions for deformed semi-finished products made of the investigated alloys were developed and batches of sheet metal with the required level of mechanical and corrosion properties were obtained.

Keywords: aluminum alloys, scandium, hot rolling, combined processes, mechanical properties, corrosion properties, structure.

Sidelnikov S.B. — Dr. Sci. (Tech.), Prof., Head of the Department of metals pressure treatment, Siberian Federal University (SibFU) (660025, Russia, Krasnoyarsk, pr. «Krasnoyarskii rabochii», 95). E-mail sbs270359@yandex.ru.

Yakiviyuk O.V. — Cand. Sci. (Tech.), Assistant, Department of metals pressure treatment, SibFU.
E-mail: yakiviyuk.olga@yandex.ru.

Baranov V.N. — Cand. Sci. (Tech.), Assistant prof., Department of general metallurgy, SibFU.

Zenkin E.Yu. — Managing director of OJSC «RUSAL Bratsk aluminium smelter».

Dovzhenko I.N. — Cand. Sci. (Tech.), Department of metals pressure treatment, SibFU.

Citation: *Sidelnikov S.B., Yakiviyuk O.V., Baranov V.N., Zenkin E.Yu., Dovzhenko I.N.* Development, modeling and research of technology for producing longish deformed semi-finished products from aluminum-magnesium alloys with low scandium contents. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 6. P. 51–59 (In Russ.).
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-6-51-59.

Введение

В настоящее время более 50 % всего мирового использования металла приходится на строительство и транспорт, причем деформированные полуфабрикаты из алюминиевых сплавов широко востребованы в судостроении и автомобилестроении. Применение передовых технологий в этом сегменте промышленности является стратегически важной задачей, так как к автомобильной и судостроительной технике предъявляются высокие требования по надежности конструкций и экономическим показателям. Основной объем полуфабрикатов, потребляемых данными отраслями, составляют изделия в виде листов, полос и плит, получаемые с применением горячей и холодной прокатки, а также прессованные прутки и проволока.

Наличие таких свойств алюминиевых сплавов, как жидкотекучесть, свариваемость, коррозионная стойкость и пластичность при сравнительно высокой прочности, характерны для алюминиево-магниевого сплава (магналий), причем уровень прочностных показателей этих материалов в значительной мере зависит от содержания в них магния и легирующих компонентов [1–6] — скандия, циркония, титана и др. Наиболее широкое распространение в промыш-

ленности получили сплавы с содержанием магния 5–6 %.

Проведенные компанией «РУСАЛ» совместно с учеными Сибирского федерального университета исследования показали, что перспективным направлением повышения механических и эксплуатационных свойств этих сплавов является легирование их скандием [7–17]. Однако сравнительно высокая его стоимость диктует необходимость снижения его концентрации в сплаве, содержание которого может достигать 35 % [2, 3], например за счет добавления циркония.

В связи с этим предложен сплав алюминия с магнием (5,2 %), в котором содержание скандия составляет 0,12 %, а циркония — 0,13 %. Для определения его деформируемости и других характеристик проведены исследования режимов обработки и свойств деформированных полуфабрикатов, полученных из этого материала [18–23].

Цель настоящих исследований состояла в разработке технологических решений для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиево-магниевого сплава с небольшим содержанием скандия (до 0,12 %), а также оценке его структуры и свойств.

Моделирование процесса горячей прокатки

Моделирование процесса горячей прокатки литых заготовок размерами $300 \times 1400 \times 1700$ мм до толщины 80 мм (1-й вариант расчета) и $445 \times 1400 \times 4000$ мм до толщины 8 мм (2-й вариант) проводилось для условий деформации на стане Кварто 2800. Диаметр валков был равен 700 мм (вар. 1) и 965 мм (вар. 2), а длина бочки — 2800 и 2885 мм соответственно. Начальная температура слитка составляла 425°C (вар. 1) и 410°C (вар. 2), скорость прокатки изменялась в пределах 1,0–5,0 и 0,5–2,0 м/с соответственно при времени паузы между проходами 10–30 с. Реологические свойства нового сплава были определены методом кручения [23] и введены в библиотеку программного пакета DEFORM-3D в виде графиков зависимости сопротивления деформации металла от скорости, степени деформации и температуры. На основании данных, полученных в результате моделирования, изучали формоизменение металла, распределение температур и напряжений в очаге деформации.

Изменение этих параметров при тех же деформационных режимах обработки, которые применялись в промышленных условиях, по ходу прокатки приведено на рис. 1. Установлено, что распределение скоростей истечения и температуры металла является неравномерным, что приводит к появлению растягивающих напряжений и, как следствие, к образованию микротрещин на кромках раската.

Анализ распределения температур по поверхности раската показал, что в первых проходах температура его боковой и передней кромок ниже, чем поверхности металла на контакте с валками, а поверхностные слои за счет более интенсивной деформации разогреваются до более высоких температур. В последующих проходах по мере уменьшения толщины заготовки температура по сечению выравнивается. Моделирование напряженно-деформированного состояния металла дало возможность сделать следующие выводы:

— деформация металла в первых проходах локализуется в приповерхностных слоях и не распространяется до центра раската, а при уменьше-

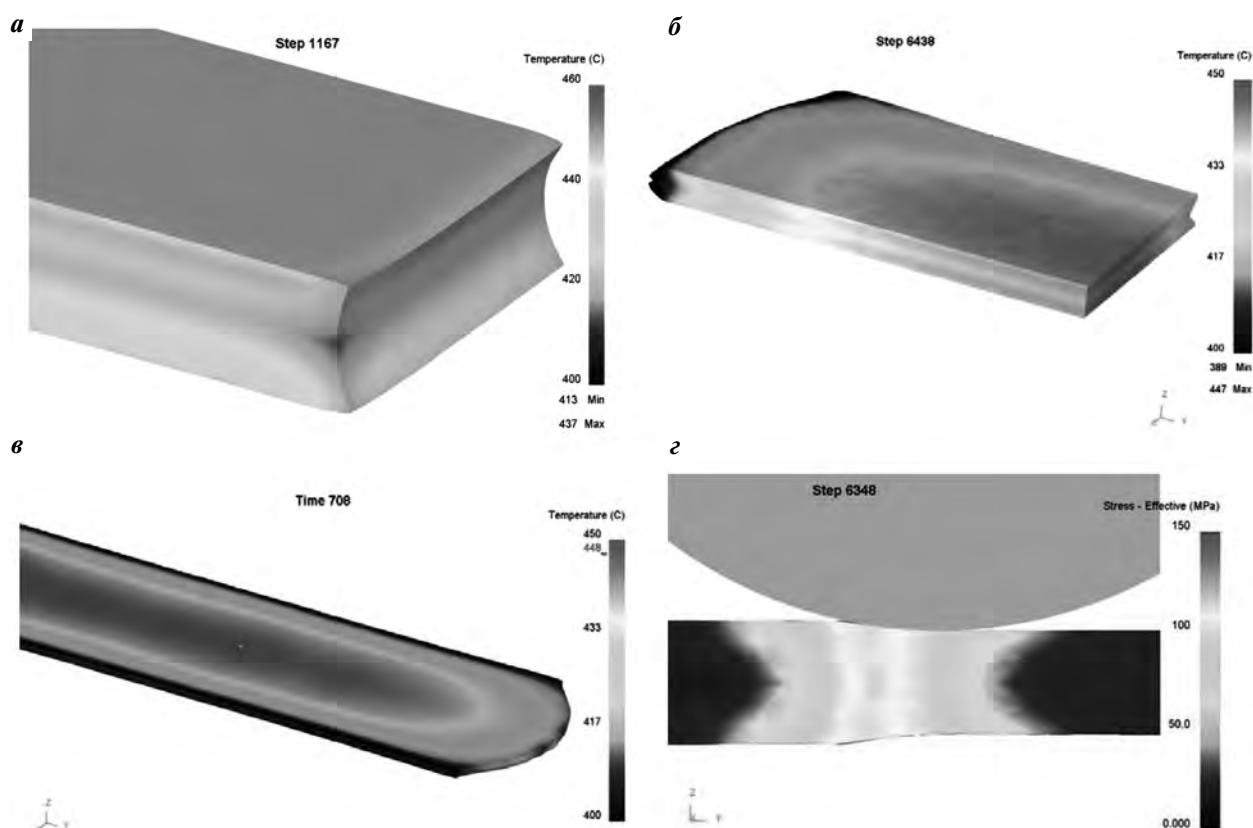


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности после 4 (а), 16 (б) и 28 (г) проходов, а также интенсивности напряжений по сечению проката (з)

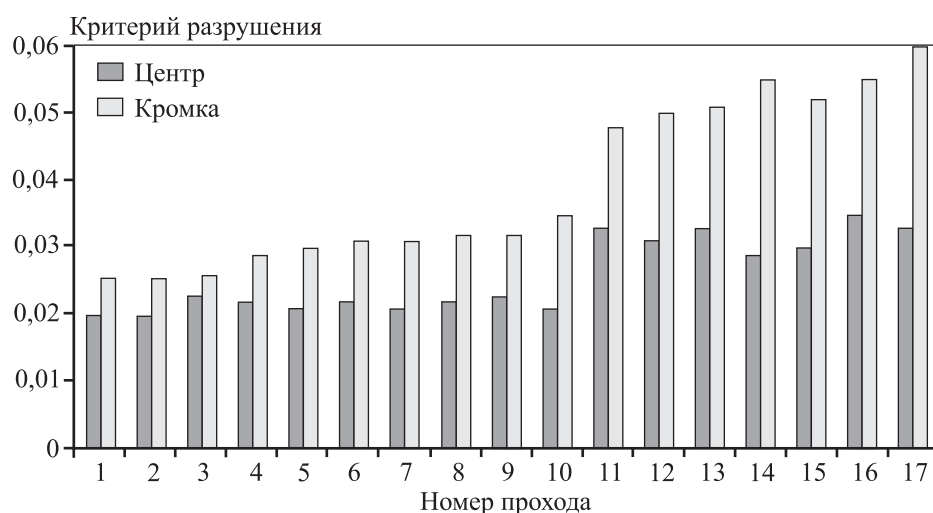


Рис. 2. Значения критерия Кокрофта–Латама по проходам

нии толщины она распространяется на всю его толщину;

— установлено наличие значительных растягивающих напряжений в металле в центре, на входе и выходе из очага деформации, а также на кромках боковой поверхности раската.

Для оценки разрушения в программном пакете DEFORM-3D применялся критерий Кокрофта–Латама, который используется для процессов горячей прокатки [24]. Анализ результатов моделирования показал, что значения этого критерия не превышают за проход 0,06. Они увеличиваются по ходу прокатки и на кромках раската выше, чем в центре (рис. 2).

Экспериментальные исследования процесса прокатки и анализ полученных результатов

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Фрезерованные заготовки из опытного сплава, прошедшие гомогенизацию по двухступенчатому режиму [21], нагревали до температуры 450 °С и подвергали горячей прокатке до заданной толщины.

Для получения листового проката толщина заготовки равнялась 28 мм, а горячекатаных полос — 5 и 10 мм. Степень суммарной деформации при горячей обработке литых заготовок до толщины 5 мм составила 82 %, а коэффициент вытяжки в среднем за проход — 1,04. Далее холодной прокаткой получали плоские полуфабрикаты толщиной $h = 3$ и 1 мм. Степень суммарной деформации при

холодной прокатке составила 70 %, а коэффициент вытяжки в среднем за проход — 1,05.

По ходу эксперимента отбирали образцы для исследования структуры и механических свойств листового материала. Пробоподготовку образцов для металлографических исследований осуществляли по общепринятой методике. Микроструктурный анализ проводили на световом микроскопе Axio Observer A1m («Carl Zeiss», Германия) с использованием программного пакета AxioVision.

На каждом из технологических переделов отбирали темплеты и изготавливали из них образцы для определения механических характеристик металла путем статических испытаний на растяжение при комнатной температуре на универсальной испытательной машине Walter+Bai AGLFM 400 кН (LFM 400). При оценке прочностных и пластических свойств образцов каждый раз фиксировали изменение длины рабочей части образца, а также соответствующее этому изменению значение растягивающей силы.

Исследования проводили в лаборатории кафедры обработки металлов давлением Института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета с использованием стана горячей прокатки ДУО 330 с диаметром валков 330 мм и длиной бочки валков 520 мм. При разработке режимов прокатки использовали авторские методики, программные средства и данные по реологическим свойствам изучаемых сплавов [23].

Анализ структуры литых и деформированных полуфабрикатов из исследуемого сплава (рис. 3)

показал следующее. Микроструктура металла гомогенизированных слитков под прокатку представлена кристаллами α -твердого раствора и включениями интерметаллидных фаз, расположенных по границам дендритных ячеек и зерен (см. рис. 3, *а*). Данные фазы имеют характерный вид скелетов, прожилок и частиц неправильной формы. Внутри зерен твердого раствора формируется субзеренная структура, что характерно для сплавов системы Al—Mg.

Для изучения возможности получения требуемого комплекса механических свойств проводили металлографический анализ образцов из опытного сплава толщиной 3 мм, полученных из заготовки с $h = 10$ мм.

Микроструктура деформированных образцов после горячей прокатки (рис. 3, *б*) состоит из вы-

тянутых зерен α -твердого раствора и включений интерметаллидов, расположенных в виде строчек по границам зерен. Микроструктура металла полуфабрикатов, полученных холодной прокаткой (см. рис. 3, *в*), включает кристаллы серого цвета в форме многогранников, кристаллы темного цвета в виде вытянутых раздробленных пластин, расположенных вдоль направления деформации, и темные кристаллы неправильной формы. Анализ структуры также показал, что деформированные и отожженные полуфабрикаты (см. рис. 3, *г*) имеют преимущественно волокнистое строение. Результаты исследований свойств литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов из исследуемого сплава приведены в табл. 1.

В качестве общих закономерностей изменения механических свойств можно отметить, что

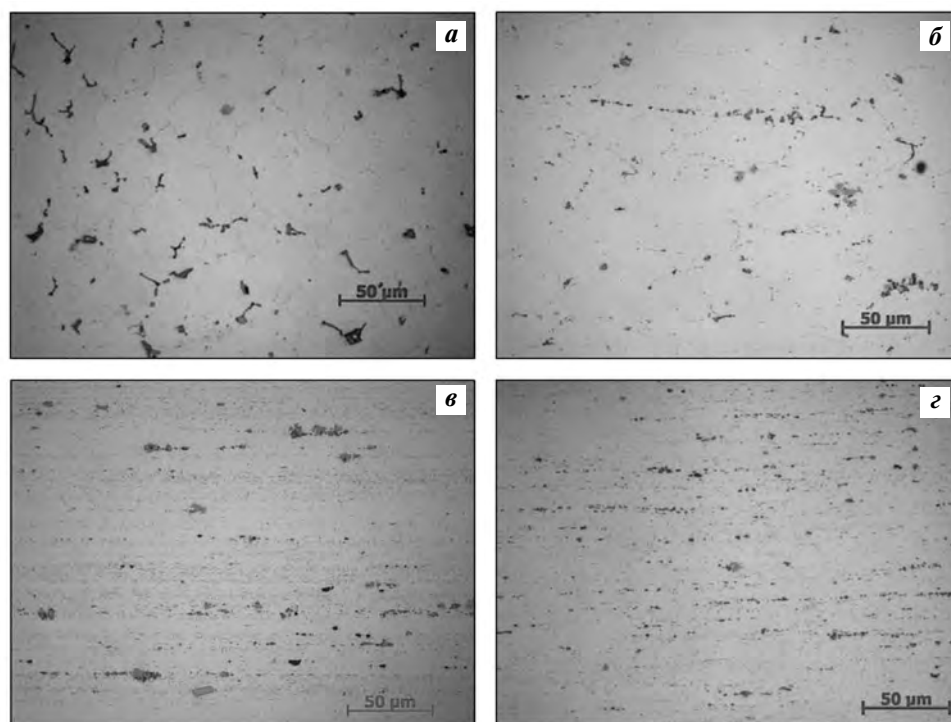


Рис. 3. Микроструктуры полуфабрикатов из опытного сплава в различных состояниях ($\times 500$)

а — слиток после гомогенизации, $h = 28$ мм; *б* — полоса после горячей прокатки, $h = 10$ мм, *в* — полоса после холодной прокатки, $h = 3$ мм; *г* — полоса после прокатки и отжига, $h = 3$ мм

Таблица 1

Механические свойства металла образцов из опытного сплава в литом, деформированном и отожженном состояниях

Полуфабрикат	h , мм	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Слиток после гомогенизации	28	312	183	9,8
Полоса после горячей прокатки	10	369	266	16,0
Полоса после холодной прокатки и отжига	3	390	277	14,0

с увеличением суммарной степени деформации временное сопротивление разрыву (σ_B) и предел текучести металла ($\sigma_{0,2}$) растут, а относительное удлинение (δ) снижается, что соответствует общим представлениям теории обработки металлов давлением. Применение отжига полуфабрикатов из опытного сплава после холодной прокатки при температуре 350 °С в течение 3 ч дает возможность получить высокие значения пластических свойств металла наряду с требуемыми характеристиками прочности.

Установлено также, что применение более высоких температур отжига для исследуемых образцов обеспечивает повышение пластичности

металла, однако величина прочностных характеристик при этом может оказаться ниже требуемых значений.

Значения силы прокатки показывают силовую загрузку оборудования при заданных режимах обжатия. При определении силы прокатки ($P_{расч}$) установлено, что погрешность расчетов не превышает данные, полученные при экспериментальной прокатке ($P_{эксп}$), и составляет в среднем 5–7 % (табл. 2).

На основе полученных результатов моделирования и экспериментальных исследований разработаны технические условия на листовой прокат (ТУ 1-3-231-2017) и в промышленных условиях

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные значения силы прокатки

№ прохода	Степень обжатия, %	Время, с		Скорость, м/с	$P_{расч}$, МН	$P_{эксп}$, МН	Погрешность, %
		Пауза	Прокатка				
1	7	4	9	0,20	9,6	9,8	2,0
2	6	4	9	0,22	12,5	13,0	3,8
3	7	5	10	0,21	12,6	13,3	5,3
4	8	8	3	0,75	20,2	21,0	3,8
5	4	4	3	0,78	19,7	20,6	4,4
6	4	4	3	0,82	19,7	20,7	4,8
7	5	19	3	0,86	18,9	20,3	6,9
8	5	5	3	0,91	19,3	20,4	5,4
9	6	21	3	0,97	18,4	19,7	6,7
10	6	5	4	0,77	18,4	19,2	4,2
11	7	21	3	1,11	18,0	19,1	5,6
12	8	5	4	0,90	18,2	18,9	3,7
13	8	5	4	0,98	17,9	18,5	3,2
14	9	5	4	1,08	17,2	17,8	3,4
15	10	19	4	1,20	16,5	17,5	5,7
16	11	6	4	1,36	17,7	18,2	2,7
17	13	6	4	1,55	17,0	17,7	3,9
18	13	5	5	1,43	16,3	17,3	5,8
19	15	7	5	1,69	16,1	17,1	5,8
20	18	6	6	1,71	17,4	18,0	3,3
21	20	6	7	1,83	17,1	17,9	4,5
22	21	6	8	2,01	17,0	17,8	4,5
23	22	6	9	2,30	17,0	17,9	5,0
24	22	9	10	2,66	16,8	17,7	5,1
25	22	58	12	2,83	16,7	17,8	6,2
26	23	10	19	2,31	18,4	19,1	3,7
27	25	28	20	2,94	18,1	18,8	3,9
28	31	38	35	2,42	19,2	20,5	6,3

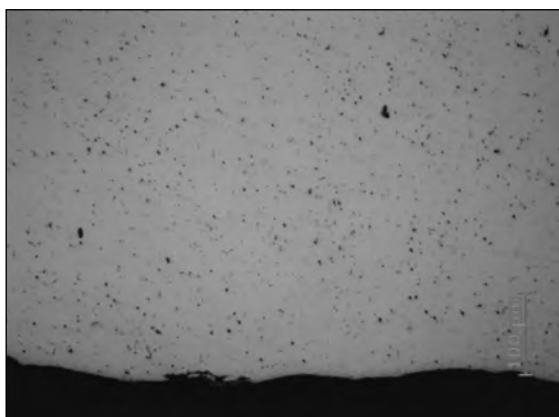


Рис. 4. Микроструктура сварного шва исследуемого сплава после межкристаллитной коррозии ($\times 200$)

получены опытные партии листового и рулонного металлов [22].

Для исследований качества сварного шва и коррозионной стойкости проводили соединение полученных прокаткой полос методом аргонодуговой сварки, после чего отбирали образцы для радиографического контроля и анализа механических свойств металла. С помощью испытаний на разрыв, проведенных на универсальной машине LFM 400, установлено, что прочность сварного шва соответствует предъявляемым требованиям и находится в интервале 0,75—0,85 от прочности основного металла [21].

Проведенные испытания коррозионной стойкости образцов из исследуемого сплава показали хорошую сопротивляемость межкристаллитной коррозии, о чем свидетельствует лишь единичный участок питтинговой коррозии глубиной 3 мкм в зоне сварного шва (рис. 4).

Исследование технологии получения сварочной проволоки

На основании результатов компьютерного моделирования процесса совмещенной обработки [23] и устройства по патенту [25] для исследуемых

сплавов была предложена и опробована технология получения сварочной проволоки с применением бесслитковой прокатки—прессования, холодной сортовой прокатки и волочения, подробно описанная в работе [21]. Она включает следующие этапы:

- приготовление расплава в тигле при температуре 780—790 °С и заливка его в закрытый калибр валков установки СПП-200 [21] с целью получения прутка диаметром 9 мм;

- холодная сортовая прокатка этого прутка на прокатном стане модели AMBIFILO VELOCE ROSEN 180+200 с целью получения длинномерной заготовки квадратного сечения с размером стороны 5 мм;

- отжиг полученной бухты по разработанным режимам [21];

- волочение заготовки на цепном волочильном стане однократного действия для получения проволоки сечением 3 мм.

В результате проведения экспериментальных исследований были изготовлены опытные партии сварочной проволоки из опытного сплава, которые использовали для получения плоских образцов со сварными соединениями.

Изучение микроструктуры деформированных полуфабрикатов из исследуемого сплава дало возможность установить, что она состоит из α -твердого раствора и интерметаллидных включений, расположенных по границам зерен (рис. 5). Ее анализ показал, что в структуре сплава имеются достаточно крупные интерметаллидные частицы в форме пластин и кристаллов размером до 20 мкм (рис. 5, а). Выявлено, что с увеличением степени деформации происходит их измельчение (рис. 5, б, в), а проведение промежуточных отжигов приводит к распаду пересыщенного твердого раствора с выделением вторичных частиц интерметаллидов (рис. 5, г).

В табл. 3 приведены значения прочностных и пластических свойств деформированных полуфабрикатов из исследуемого сплава в различных состояниях по технологическим переходам.

Таблица 3

Механические свойства полуфабрикатов из исследуемого сплава

Полуфабрикат	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
Пруток $\varnothing$ 9 мм после бесслитковой прокатки—прессования	320	221	25
Пруток размером 5×5 мм после сортовой прокатки и отжига	410	285	14
Проволока $\varnothing$ 3 мм после волочения и отжига	371	261	19

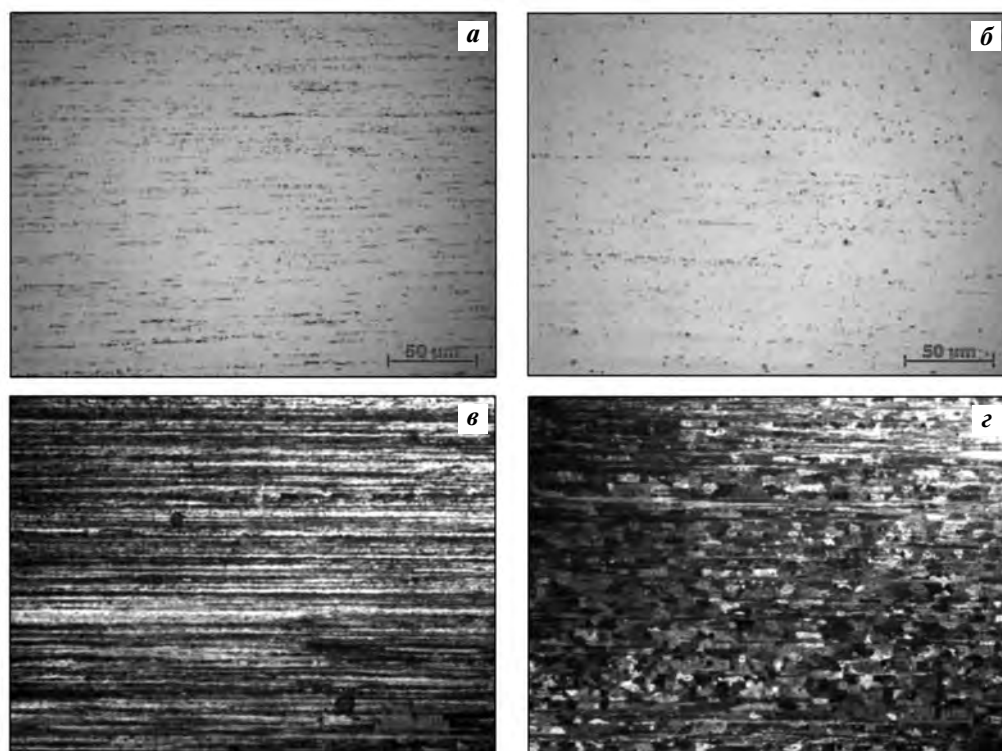


Рис. 5. Микроструктура прутка из опытного сплава диаметром 9 мм (*а*), а также проволоки диаметром 3 мм в деформированном (*б, в*) и отожженном (*з*) состояниях
а, б — увеличение 500 $\times$; *в, з* — 200 $\times$

Выводы

1. Разработаны технологии получения длинномерных полуфабрикатов в литом, деформированном, отожженном и сварном состояниях для производства листового проката, прутков и проволоки из алюминиево-магниевого сплава с пониженным содержанием скандия (до 0,12 %).

2. С применением программного комплекса DEFORM-3D проведено моделирование процессов горячей листовой прокатки и бесслитковой прокатки—прессования прутков. Даны рекомендации для промышленного освоения технологии получения деформированных и сварных полуфабрикатов для судо- и автомобилестроения.

3. Изучены структура и свойства длинномерных полуфабрикатов из исследуемого Al—Mg-сплава с пониженным содержанием скандия по технологическим переделам.

4. Из экспериментального сплава с малыми (<0,12 %) добавками скандия получены опытные партии сварочной проволоки, с применением которой из плоского проката изготовлены сварные образцы, имеющие высокие устойчивость к межкристаллитной коррозии и прочность сварного шва.

Данная работа выполнена по проекту 03.G25.31.0265 «Разработка экономнолегированных высокопрочных Al—Sc-сплавов для применения в автомобильном транспорте и судоходстве» в рамках Программы реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологического производства, утвержденных постановлением Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218.

Литература/References

1. Горбунов Ю.А. Применение изделий из алюминиевых сплавов при производстве и ремонте наземного и водного транспорта в РФ. *Технология легких сплавов*. 2015. No. 1. С. 87—92.
Gorbunov Yu.A. Application of products from aluminum alloys in the manufacture and repair of land and water transport in the Russian Federation. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2015. No. 1. P. 87—92 (In Russ.).
2. Бронз А.В., Ефремов В.И., Плотников А.Д., Чернявский А.Г. Сплав 1570С — материал для герметичных конструкций перспективных многоразовых изделий РКК «Энергия». *Космическая техника и технологии*. 2014. No. 4. С. 62—67.
Bronz A.V., Efremov V.I., Plotnikov A.D., Chernyavsky A.G. Alloy 1570C — a material for hermetic structures of the perspective reusable products of RSC «Energia». *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*. 2014. No. 4. P. 62—67 (In Russ.).

3. Филатов Ю.А., Плотников А.Д. Структура и свойства деформированных полуфабрикатов из алюминиевого сплава 01570С системы Al—Mg—Sc для изделия РКК «Энергия». *Технология легких сплавов*. 2011. No. 2. С. 15—26.
Filatov Yu.A., Plotnikov A.D. Structure and properties of deformed semi-finished products from aluminum alloy 01570C of the Al—Mg—Sc system for the RSC «Energia» product. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2011. No. 2. P. 15—26 (In Russ.).
4. Орлов Г.А. Технологические процессы обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2013.
Orlov G.A. Technological processes of metal forming. Ekaterinburg: Uralskii Federal University, 2013 (In Russ.).
5. Луц А.Р., Суслина А.А. Алюминий и его сплавы. Самара: СамГТУ, 2013.
Luts A.R., Suslina A.A. Aluminium and his alloys. Samara: Samara State Technical University, 2013 (In Russ.).
6. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. М.: Изд. дом МИСиС, 2010.
Belov N.A. Phase composition of industrial and advanced aluminum alloys. Moscow: MISIS, 2010 (In Russ.).
7. Toropova L.S., Eskin D.S., Kharakterova M.L., Dobatkina T.V. Advanced aluminum alloys containing scandium: Structure and properties. Amsterdam: Gordon and Breach Sci. Publ., 1998.
8. Marquis E.A., Seidman E.A. Nanoscale structural evolution of Al₃Sc precipitates in Al (Sc) alloys. *Acta Mater.* 2001. Vol. 49. No. 11. P. 1909—1919.
9. Fuller C.B., Seidman D.N. Temporal evolution of the nanostructure of Al(Sc,Zr) alloys: Part II. Coarsening of Al₃(Sc_{1-x}Zr_x) precipitates. *Acta Mater.* 2005. Vol. 53. No. 20. P. 5415—5428.
10. Ryset J., Rym N. Scandium in aluminum alloys. *Inter. Mater. Rev.* 2005. Vol. 50. No. 1. P. 19—44.
11. Zhemchuzhnikova D., Kaibyshev R. Effect of grain size on cryogenic mechanical properties of an Al—Mg—Sc alloy. *Adv. Mater. Res.* 2014. Vol. 922. P. 862—867.
12. Malopheyev S., Kulitskiy V., Kaibyshev R. Deformation structures and strengthening mechanisms in an Al—Mg—Sc—Zr alloy. *J. Alloys and Compd.* 2017. Vol. 698. P. 957—966.
13. Pereira Pedro Henrique R., Wang Ying Chun, Huang Yi, Langdon Terence G. Influence of grain size on the flow properties of an Al—Mg—Sc alloy over seven orders of magnitude of strain rate. *Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. A685. P. 367—376.
14. Mondol S., Alamb T., Banerjee R., Kumar S., Chattopadhyay K. Development of a high temperature high strength Al alloy by addition of small amounts of Sc and Mg to 2219 alloy. *Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. A687. P. 221—231.
15. Shi Chunchang, Zhang Liang, Wu Guohua, Zhang Xiaolong, Chen Antao, Tao Jiashen. Effects of Sc addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al—3Li—1.5Cu—0.15Zr alloy. *Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. A687. P. 232—238.
16. Li Mengjia, Pan Qinglin, Shi Yunjia, Sun Xue, Xiang Hao. High strain rate superplasticity in an Al—Mg—Sc—Zr alloy processed via simple rolling. *Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. A687. P. 298—305.
17. Buranova Yu, Kulitskiy V., Peterlechner M., Mogucheva A., Kaibyshev R., Divinski S., Wilde G. Al₃(Sc, Zr) — based precipitates in Al—Mg alloy: Effect of severe deformation. *Acta Mater.* 2017. Vol. 124. P. 210—224.
18. Dovzhenko I.N., Dovzhenko N.N., Sidelnikov S. B., Konstantinov I.L. 3D modelling of the large-capacity ingots of an Al—Mg system aluminium alloy doped with scandium rolling process. *Non-Ferr. Met.* 2017. No. 2. P. 60—64.
19. Baranov V.N., Sidelnikov S.B., Frolov V.F., Zenkin E.Yu., Orelkina T.A., Konstantinov I.L., Voroshilov D.S., Yakivyyuk O.V., Belokonova I.N. Investigation of mechanical properties of cold-rolled, annealed and welded semi-finished products from the test alloys of Al—Mg system, economically alloyed with scandium. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2018. Vol. 411. No. 012015. P. 1—5.
20. Baranov V., Sidelnikov S., Zenkin E., Frolov V., Voroshilov D., Yakivyyuk O., Konstantinov I., Sokolov R., Belokonova I. Study of strength properties of semi-finished products from economically alloyed high-strength aluminium-scandium alloys for application in automobile transport and shipbuilding. *Open Eng.* 2018. No. 8. P. 69—76.
21. Baranov V., Sidelnikov S., Zenkin E., Yakivyyuk O. Physical modeling technological regimes of production deformed semi-finished products from experimental aluminium alloys alloyed by scandium. *Mater. Sci. Forum.* 2018. Vol. 918. P. 54—62.
22. Mann V.Kh., Sidelnikov S.B., Konstantinov I.L., Baranov V.N., Dovzhenko I.N., Voroshilov D.S., Lopatina E.S., Yakivyyuk O.V., Belokonova I.N. Modeling and investigation of the process of hot rolling of large-sized ingots from aluminum alloy of the Al—Mg system, economically alloyed by scandium. *Mater. Sci. Forum.* 2019. Vol. 943. P. 58—65.
23. Sidelnikov S.B., Yakivyyuk O.V., Baranov V.N., Konstantinov I.L., Dovzhenko I.N., Lopatina E.S., Voroshilov D.S., Samchuk A.P., Frolov V.A. Computer simulation, analysis of force and temperature-speed parameters of the process of combined machining of Al—Mg—Sc alloys. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 544. No. 012018. P. 1—5.
24. Матвеев М.А. Оценка вероятности разрушения металла при горячей пластической деформации с помощью критерия Кокрофта—Латама. *Науч.-техн. ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Т. 23. No. 2. С. 109—126.
Matveev M.A. Numerical estimation of the probability of metal failure under hot plastic deformation by means of the Cockcroft-Latham criterion. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbSPU. Estestvennye i inzhenernye nauki*. 2017. Vol. 23. No. 2. P. 109—126 (In Russ.).
25. Сидельников С.Б., Беспалов В.М., Довженко Н.Н., Беляев С.В., Солдатов С.В., Трифоненков Л.П., Сидельников А.С., Федорова О.В. Устройство для непрерывной прокатки и прессования катанки из цветных металлов и сплавов: Пат. 139085 (РФ). 2014.
Sidelnikov S.B., Bepalov V.M., Dovzhenko N.N., Belyaev S.V., Soldatov S.V., Trifonenkov L.P., Sidelnikov A.S., Fedorova O.V. Device for the continuous rolling and pressing of wire rod from non-ferrous metals and alloys: Pat. 139085 (RF). 2014 (In Russ.).