

РАЗРАБОТКА И ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПРУТКОВ СПЛАВА Д16(Т) ИЗ НЕПРЕРЫВНО-ЛИТЫХ ЗАГОТОВОК МАЛОГО ДИАМЕТРА С НИЗКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ВЫТЯЖКИ

© 2022 г. С.П. Галкин, А.С. Алещенко, Ю.В. Гамин

Национальный исследовательский технологический университет (НИТУ) «МИСиС», г. Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 10.01.22 г., доработана 20.01.22 г., подписана в печать 28.01.22 г.

Аннотация: Разработана и опробована в опытно-промышленном масштабе технология производства прутков из алюминиевого сплава Д16(Т), полученных способом радиально-сдвиговой прокатки из непрерывно-литых заготовок диаметром 72 мм за несколько проходов. Фактические диаметры прокатанных прутков находились в пределах допуска $\pm 0,16$ мм, что существенно меньше требований, предусмотренных ГОСТ 21488-97. По результатам испытаний методом растяжения определены значения предела прочности, условного предела текучести, относительного удлинения и относительного сужения. Требования нормативной документации по пределу прочности и относительному удлинению для сплава Д16Т удовлетворяются при суммарном коэффициенте вытяжки более 4,2. По пластическим свойствам полученные прутки в 2,1–2,5 раза превышают требования указанного ГОСТ во всем диапазоне исследованных коэффициентов вытяжки, начиная с 2,07. При этом отмечается повышение относительного удлинения в 5,7–6,8 раза по сравнению с исходным литым состоянием. Проведенный анализ микроструктуры и морфологии вторичных фаз показал, что с уменьшением диаметра прутка (с увеличением суммарного коэффициента вытяжки) средний размер частиц нерастворимой в алюминиевой матрице фазы $\alpha(\text{AlFeMnSi})$ уменьшается, что является следствием развития деформационных процессов при прокатке. Дополнительное измельчение включений при деформационной обработке позволяет существенно снизить возможный негативный эффект от нерастворимой фазы на механические свойства получаемой заготовки, в особенности на показатель пластичности. Согласно результатам анализа микроструктуры выявлено, что прутки после прокатки и термообработки не имеют трещин, скоплений усадочных пор, расслоений и других дефектов и удовлетворяют требованиям ГОСТ 21488-97.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, радиально-сдвиговая прокатка, коэффициент вытяжки, алюминиевый сплав Д16.

Галкин С.П. — докт. техн. наук, профессор кафедры обработки металлов давлением (ОМД) НИТУ «МИСиС» (119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 4). E-mail: glk-omd@yandex.ru.

Алещенко А.С. — канд. техн. наук, доцент кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». E-mail: judger85@mail.ru.

Гамин Ю.В. — канд. техн. наук, доцент кафедры ОМД НИТУ «МИСиС». E-mail: y.gamin@mail.ru.

Для цитирования: Галкин С.П., Алещенко А.С., Гамин Ю.В. Разработка и опытно-промышленное опробование технологии получения деформированных прутков сплава Д16(Т) из непрерывно-литых заготовок малого диаметра с низкими коэффициентами вытяжки. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022. Т. 28. № 2. С. 71–79.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-2-71-79.

Development and experimental testing of the technology for producing deformed bars of D16(T) alloy from continuously cast billets of small diameter with low elongation ratios

S.P. Galkin, A.S. Aleshchenko, Yu.V. Gamin

National University of Science and Technology (NUST) «MISIS», Moscow, Russia

Received 10.01.2022, revised 20.01.2022, accepted for publication 28.01.2022

Abstract: The article describes the development and pilot-scale testing of the technology for producing bars of the D16(T) aluminum alloy by radial-shear rolling from continuously cast billets with a diameter of 72 mm in several passes. The actual dimensions of rolled bars were within

the ± 0.16 mm tolerance for all bar diameters, which significantly surpasses the GOST 21488-97 requirements. According to the results of tensile tests, the values of ultimate strength, conventional yield strength, relative elongation and relative reduction were determined. Ultimate strength and relative elongation requirements specified by regulatory documents for the D16(T) alloy were met with a total elongation ratio of more than 4.2. In terms of plastic properties, the obtained bars surpass the GOST requirements by 2.1–2.5 times in the entire range of elongation ratios investigated starting from 2.07. At the same time, there is an increase in the relative elongation by 5.7–6.8 times in comparison with the initial cast state. The microstructure and morphology analysis conducted for secondary phases showed that with a decrease in the bar diameter (with an increase in the total elongation ratio), the average particle size of the $\alpha(\text{AlFeMnSi})$ phase insoluble in the aluminum matrix decreases, which is a consequence of deformation processes developed during rolling. Additional grinding of inclusions during deformation processing can significantly reduce the possible negative effect of the insoluble phase on the mechanical properties of resulting bars, in particular on the plasticity properties. The microstructure analysis showed that bars after rolling and heat treatment are free from cracks, looseness, delamination, and other defects and meet the requirements of GOST 21488-97.

Keywords: aluminium alloy, radial-shear rolling, elongation ratio, D16.

Galkin S.P. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of metal forming of National University of Science and Technology (NUST) «MISIS» (119991, Russia, Moscow, Leninskii pr., 4). E-mail: glk-omd@yandex.ru.

Aleshchenko A.S. — Cand. Sci. (Eng.), Assistant professor of the Department of metal forming of NUST «MISIS». E-mail: judger85@mail.ru.

Gamin Yu.V. — Cand. Sci. (Eng.), Assistant professor of the Department of metal forming of NUST «MISIS». E-mail: y.gamin@mail.ru.

For citation: Galkin S.P., Aleshchenko A.S., Gamin Yu.V. Development and experimental testing of the technology for producing deformed bars of D16(T) alloy from continuously cast billets of small diameter with low elongation ratios. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2022. Vol. 28. No. 2. P. 71–79 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2022-2-71-79.

Введение

Широкое замещение стали легкими металлами, и в первую очередь алюминием, составляет одно из наиболее фундаментальных направлений современного этапа развития техники, которое позволяет существенно снизить энергоёмкость машин, агрегатов, а также технологий промышленного производства [1, 2]. При этом отмечается быстро возрастающая динамика рынка полуфабрикатов и профилей из алюминия и его сплавов. Весьма актуальным становится оперативное производство прутков малыми и сверхмалыми партиями в расширенном сортаменте [3, 4].

Традиционные методы производства прутков из сплавов алюминия, как правило, основаны на прессовании мерных заготовок из слитков диаметром 200–350 мм и длиной менее 1 м [5, 6]. Коэффициент вытяжки при этом составляет $\mu = 50\div 70$ и более. Для реализации такой технологии применяется массоэнергоёмкое прессовое оборудование с дорогостоящими матрицами под каждый профильеразмер. Эффективность производства обеспечивается большими объемами продукции ограниченного сортамента.

Для малых и средних (ограниченных) объемов производства требуются гибкие технологии с максимальным сближением сечений (по площади) исходного слитка и получаемых прутков, т.е. с минимально необходимым коэффициентом вытяжки.

Радиально-сдвиговая прокатка на мини-станках (РСП-мини) весьма перспективна для решения задач такого рода, поскольку она позволяет достигать полной проработки структуры литого металла при относительно малых значениях μ [7–10]. Конструкция мини-станков РСП отличается компактностью и надежностью. Технологическая мобильность обеспечивается универсальностью «простых» по форме рабочих валков, их быстрой перенастройкой и доступностью автоматического режима работы.

Среди существующих альтернатив РСП следует выделить метод продольной (сортовой) прокатки в клетях с 3-валковыми калибрами [11, 12] и деформирование на ротационно(радиально)-ковочных машинах (РКМ) [13, 14]. Первый вариант предполагает непрерывную прокатку в 5–9-клетевом блоке. Для его реализации требуется большой парк сменных рабочих клеток с валками различных калибровок и диаметров. Под каждый чистовой размер проката необходим индивидуальный комплект клеток (валков). Данный способ имеет несопоставимо более высокую массу и стоимость оборудования.

Технология ротационной (радиальной)ковки имеет крайне низкую производительность и схожие проблемы, связанные с отсутствием универсальности рабочего инструмента (бойков), которые меняются под узкий диапазон диаметров.

Более 25 лет технология прокатки на мини-станках РСП конструкции МИСиС успешно применяется как в промышленном производстве [15], так и в научно-исследовательских целях [16–18]. Они используются для получения структурированных прутков из меди [19], магниевых [20, 21], алюминиевых [22, 23] и титановых [24] сплавов, а также баббита [25] и других металлических материалов [26]. Имеется положительный опыт радиально-сдвиговой прокатки прутков двухфазных титановых сплавов [27] и жаропрочных сплавов на никелевой основе [28] из слитков малого диаметра.

Сплавы алюминия с магнием и медью, называемые «дюралюми», применяются в качестве конструкционных материалов в авиационной и космической промышленности благодаря их прочности и относительной легкости. Алюминиевый сплав марки Д16(Т) — дюралюминий повышенной прочности системы Al—Cu—Mg, который по твердости и механической прочности не уступает стали, обладая при этом в 3 раза меньшим удельным весом [5, 6].

Основной целью данной работы являлось опытно-промышленное опробование технологии получения деформированных прутков на станках радиально-сдвиговой прокатки из непрерывно-литой заготовки алюминиевого сплава Д16(Т) малого сечения с минимальными коэффициентами вытяжки.

Методы и материалы исследования

В качестве материала для исследований была использована непрерывно-литая заготовка (НЛЗ) из сплава Д16(Т), химический состав которого в соответствии с ГОСТ 4784-2019 приведен ниже, мас. %:

Al.....	90,9—94,7	Cr.....	до 0,1
Cu.....	3,8—4,9	Ti.....	до 0,15
Mg.....	1,2—1,8	Zn.....	до 0,25
Fe.....	до 0,5	Ti + Zr.....	до 0,2
Si.....	до 0,5	Примеси:	
Mn.....	0,3—0,9	всего.....	0,15
		каждая.....	0,05

Прокатка производилась на станках радиально-сдвиговой прокатки на кафедре обработки металлов давлением НИТУ «МИСиС», технические характеристики и внешний вид которых представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1. Технические характеристики станов винтовой прокатки МИСиС

Table 1. Specifications of MISIS screw-rolling mills

Параметр	Стан	
	14-40	100Т
Исходная заготовка:		
диаметр, мм	40–25	120–50
длина, мм	200 –2000	900–2000
Готовый прокат:		
диаметр, мм	25–45	28–70
длина, мм	до 6000	до 6000
точность, %	до 1	до 1
кривизна, мм/м	до 1	до 1
Коэффициент вытяжки μ	1,1–4,0	1,1–4,0
Производительность, т/ч	0,4–2,0	1,0–5,0
Мощность приводов, кВт	3×11,5	3×100
Масса стана, т	5,4	12,0

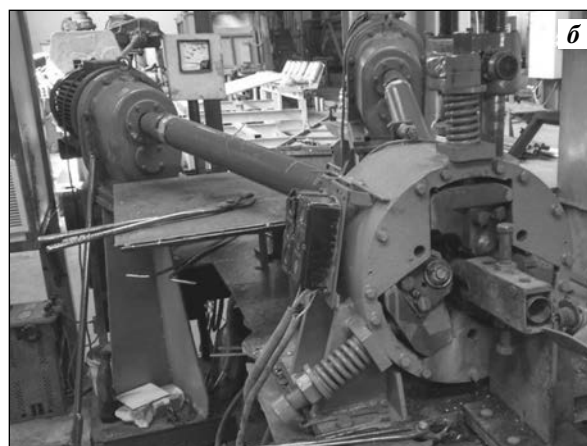
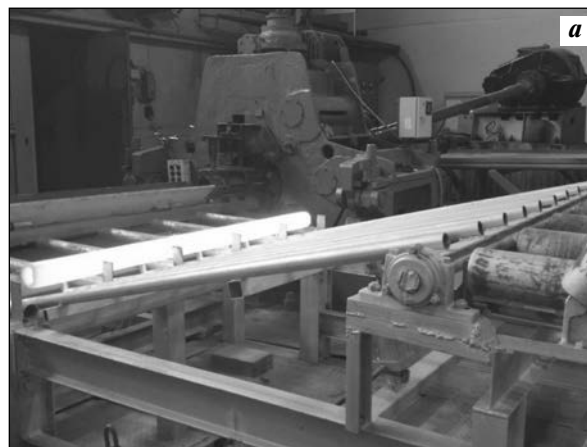


Рис. 1. Внешний вид станов МИСиС 100Т (а) и 14-40 (б)

Fig. 1. Appearance of 100T (a) and 14-40 (b) MISIS mills

Таблица 2. Маршруты прокатки образцов

Table 2. Sample rolling routes

Конечный диаметр прутка, мм	Диаметр после прохода, мм					
	1	2	3	4	5	6
50	50	—	—	—	—	—
40	55	40	—	—	—	—
35	55	40	35	—	—	—
28	55	42	35	28	—	—
16	55	42	35	28	22	16

Таблица 3. Распределение коэффициента вытяжки по проходам

Table 3. Distribution of elongation ratios by passes

Конечный диаметр прутка, мм	Коэффициент вытяжки по проходам						μ_{Σ}
	1	2	3	4	5	6	
50	2,07	—	—	—	—	—	2,1
40	1,71	1,89	—	—	—	—	3,2
35	1,71	1,89	1,31	—	—	—	4,2
28	1,71	1,71	1,44	1,56	—	—	6,6
16	1,71	1,71	1,44	1,56	1,62	1,89	20,3

Тестирование технологии РСП включало следующие основные операции:

- выплавка и разливка сплава Д16(Т) на вертикальной машине непрерывного литья заготовок диаметром 72 мм;
- раскрой исходных прутков на заготовки мерной длины с помощью ленточных пил;
- нагрев заготовок до температуры горячей деформации;
- настройка валков на калибр первого прохода и горячая прокатка;
- подогрев заготовок, сведение валков на очередной калибр;
- прокатка в очередном проходе.

Прокатывались прутки диаметрами 50, 40, 35, 28 и 16 мм. Прокатка прутков $\varnothing 50$ мм производилась за 1 проход на стане 100Т из НЛЗ $\varnothing 72$ мм. Прутки меньших диаметров прокатывались из промежуточной заготовки $\varnothing 55$ мм на стане 14-40 за 1–5 проходов. Предварительно исходные заготовки нагревались до температуры $400 + 5$ °С в течение $60 + 10$ мин в камерной печи электросопротивления с карбидокремниевыми нагревателями мощностью 40 кВт. Маршруты прокатки заготовок (1–6) представлены в табл. 2. Между прохода-

ми раскаты подогревались 10–15 мин для перенастройки калибра.

При прокатке коэффициент вытяжки варьировался в интервале $\mu = 1,31 \div 2,07$ (табл. 3). Полученные прутки подвергались визуальному осмотру и контролю геометрических размеров.

Кроме того, для анализа механических свойств были отобраны образцы из прокатанных прутков диаметрами 16, 28, 35, 45 и 50 мм, а также исходной заготовки $\varnothing 72$ мм. Часть образцов была подвержена термической обработке, включающей закалку с температуры 490 °С в воду и естественное старение в течение 120 ч, после которой также проводили испытания механических свойств.

От прокатанных прутков диаметрами 50, 28 и 16 мм были отобраны образцы для анализа микроструктуры, которую исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA3 («TESCAN», Чехия) с использованием системы электронного микрозондового анализа EMPA («Oxford Instruments», Великобритания). Металлографические образцы шлифовали абразивной бумагой SiC, полировали алмазной суспензией зернистостью 1 мкм и травили 1 % -ным водным раствором фтороводорода (HF).

Результаты и их обсуждение

Геометрические параметры

- Процесс прокатки во всех проходах проходил:
- со стабильным естественным захватом заготовки валками, без приложения внешних усилий;
 - с устойчивым движением раската в стационарной стадии без пробуксовок, искривления и вибраций;
 - со свободным выходом заднего конца заготовки из очага деформации.

Фактические размеры прокатанных прутков находились в пределах допуска $\pm 0,16$ мм для всех диаметров, что существенно превосходит требования ГОСТ 21488-97, где допускаются отклонения в пределах от $-0,43$ до $-0,62$ мм в зависимости от диаметра.

На поверхности прокатанных прутков не было обнаружено трещин, плен, закатов, рисок и других видов наружных дефектов.

Механические свойства

Для анализа механических свойств были отобраны образцы из прокатанных прутков диаметрами 16, 28 и 50 мм на расстоянии середины радиуса прутка (для прутков $\varnothing 35$ –72 мм) и из центральной зоны (для прутков $\varnothing 28$ и $\varnothing 16$ мм). По результатам испытаний методом растяжения определены зна-

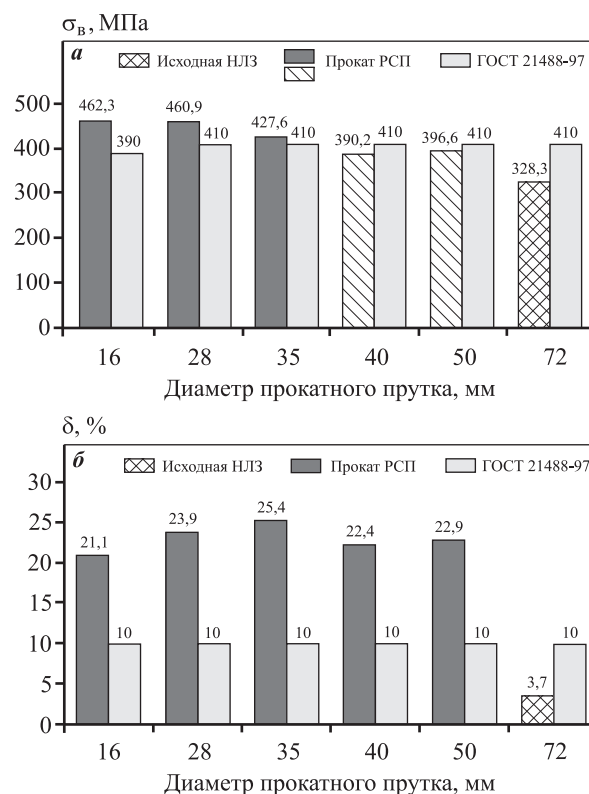


Рис. 2. Предел прочности (а) и относительное удлинение (б) сплава Д16(Т) в прутках различных диаметров

Fig. 2. Ultimate strength (а) and relative elongation (б) of D16(T) alloy in bars of different diameters

Таблица 4. Результаты механических испытаний горячекатаных прутков из сплава Д16(Т)

Table 4. Mechanical test results for hot-rolled bars made of D16(T) alloy

Диаметр прутка, мм	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	Место отбора образца
Без термической обработки					
16	197,43	348,71	20,17	34,39	Центр
28	173,81	291,15	18,64	39,16	Центр
35	149,46	284,12	21,30	32,76	$1/2$ радиуса
40	154,60	286,55	21,31	36,00	$1/2$ радиуса
72	144,88	293,31	10,51	9,75	$1/2$ радиуса
После закалки и старения					
16	293,98	462,25	21,09	26,73	Центр
28	308,22	460,90	23,92	32,76	Центр
35	259,68	427,56	25,42	31,11	$1/2$ радиуса
40	245,19	390,17	22,39	34,39	$1/2$ радиуса
50	248,26	396,58	22,94	26,04	$1/2$ радиуса
72	248,13	328,26	3,67	5,13	$1/2$ радиуса

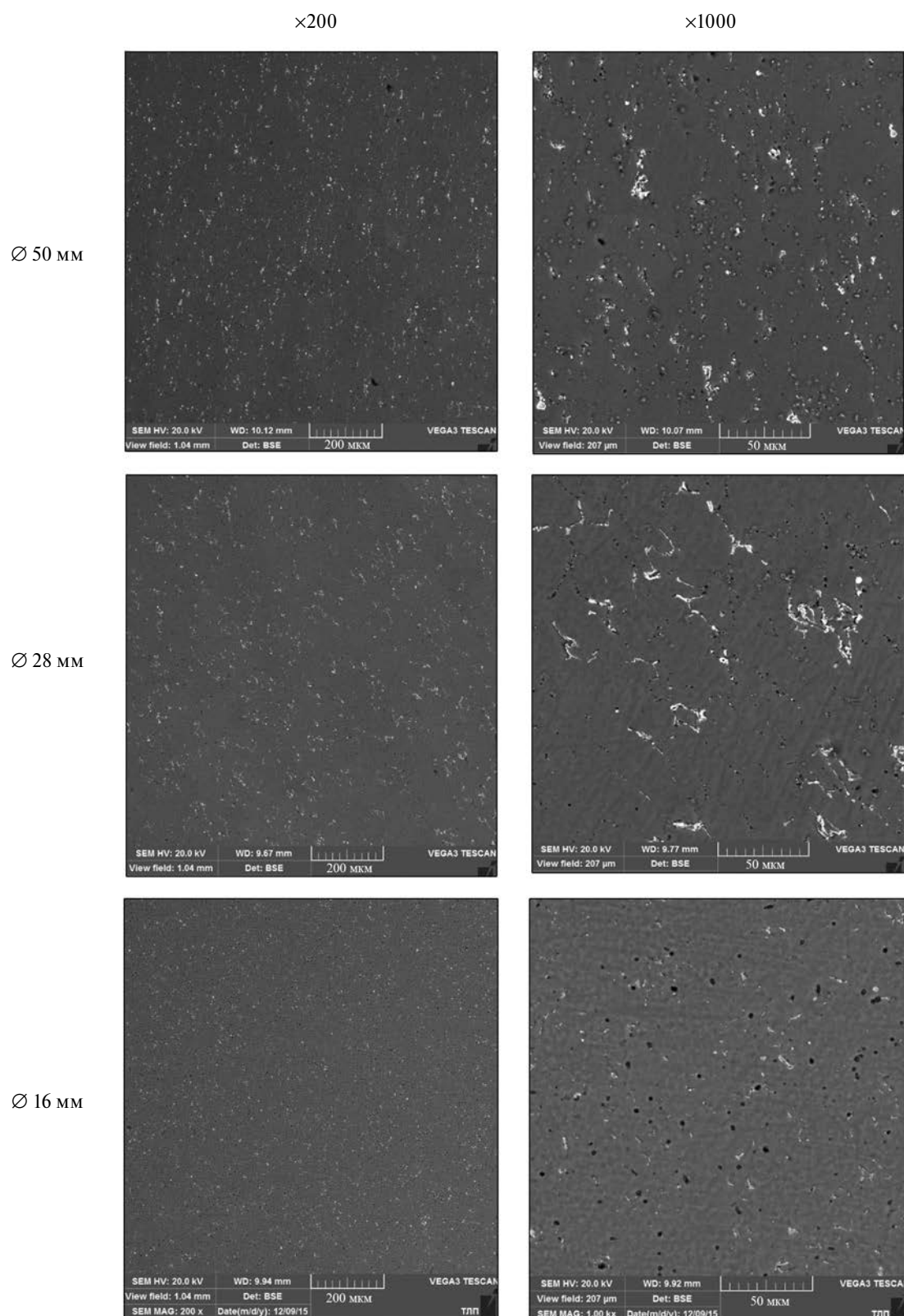


Рис. 3. Микроструктура (СЭМ) образцов алюминиевого сплава Д16(Т), отобранных от прутков различных диаметров после радиально-сдвиговой прокатки

Fig. 3. Microstructure (SEM) of D16(T) aluminum alloy samples taken from bars of different diameters after radial-shear rolling

чения предела прочности (σ_B), условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$), относительного удлинения (δ) и относительного сужения (ψ). Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Действующим стандартом ГОСТ 21488-97 регламентируются предел прочности и относительное удлинение. На рис. 2 показано сопоставление фактического уровня механических свойств прокатанных прутков и требований нормативно-технической документации. Как следует из его данных, требования ГОСТ 21488-97 удовлетворяются при диаметрах прутка до 35 мм, т. е. при суммарном коэффициенте вытяжки более 4,2. По пластическим свойствам опытные прутки в 2,1–2,5 раза превышают требования ГОСТ во всем диапазоне исследованных коэффициентов вытяжки, начиная с 2,07. При этом отмечается повышение относительного удлинения в 5,7–6,8 раза по сравнению с исходным литым состоянием.

Микроструктура

От прокатанных прутков диаметрами 50, 28 и 16 мм были отобраны образцы для анализа микроструктуры.

После РСП в структуре сплава наблюдается содержание включений, выявляемых при анализе СЭМ-снимков, в виде светлых кристаллов (рис. 3). Морфология и расположение в структуре этих кристаллов свидетельствуют о принадлежности к нерастворимой в алюминиевой матрице фазе $\alpha(\text{AlFeMnSi})$ эвтектического происхождения. Можно отметить, что с уменьшением диаметра прутка (с увеличением суммарного коэффициента вытяжки) средний размер этих частиц в сплаве уменьшается, что является следствием развития деформационных процессов при обработке. Дополнительное измельчение включений при деформации позволяет существенно снизить возможный негативный эффект от нерастворимой фазы на механические свойства получаемой заготовки, в особенности на показатель пластичности.

Микроструктура прутков, прошедших закалку, не имеет следов пережога. Анализ микроструктуры этих образцов показал отсутствие трещин, рыхлости, расслоений и утяжин и соответствие требованиям ГОСТ 21488-97.

Заключение

Проведено опытно-промышленное опробование технологии получения прутков из непрерыв-

но-литой заготовки алюминиевого сплава Д16(Т) на станах радиально-сдвиговой прокатки.

Получены прутки диаметром от 50 до 16 мм с различным коэффициентом вытяжки. Фактические отклонения диаметра прокатанных прутков находились в пределах $\pm 0,16$ мм, что существенно превосходит требования ГОСТ 21488-97.

Проведенные испытания на механические свойства выявили, что наилучшие показатели были у образцов от $\varnothing 35$ мм и менее, т. е. при $\mu_\Sigma > 4,2$. По пластическим свойствам опытные прутки в 2,1–2,5 раза превышают требования ГОСТ во всем диапазоне исследованных коэффициентов вытяжки, начиная с 2,07. При этом отмечается повышение относительного удлинения в 5,7–6,8 раза по сравнению с исходным литым состоянием.

Анализ микроструктуры образцов показал, что с уменьшением диаметра прутка (с увеличением μ_Σ) средний размер частиц фаз в сплаве уменьшается, что является следствием развития деформационных процессов в сплаве и ведет к увеличению прочностных характеристик. Микроструктура прутков, прошедших закалку, не имеет следов пережога, трещин, рыхлости, расслоений и утяжин и удовлетворяет требованиям ГОСТ 21488-97.

Литература/References

1. Heinz A., Haszler A., Keidel C., Moldenhauer S., Benedictus R., Miller W.S. Recent developments in aluminum alloys for aerospace applications. *Mater. Sci. Eng. A*. 2000. Vol. 280. No. 1. P. 102–107. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00674-7.
2. Warner T. Recently-developed aluminium solutions for aerospace applications. *Mater. Sci. Forum*. 2006. Vol. 519–521. P. 1271–1278. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.519-521.1271.
3. Galkin S.P. Radial shear rolling as an optimal technology for lean production. *Steel Trans.* 2014. No. 44. P. 61–64. DOI: 10.3103/S0967091214010069.
4. Negodin D.A., Galkin S.P., Kharitonov E.A., Karpov B.V., Khar'kovskii D.N., Dubovitskaya I.A., Patrino P.V. Testing of the technology of radial-shear rolling and pre-designing selection of rolling minimills for the adaptable production of titanium rods with small cross sections under the conditions of the «CHMP» JSC. *Metallurgist*. 2019. No. 62. P. 1133–1143. DOI: 10.1007/s11015-019-00765-3.
5. Алиева С.Г., Альтман М.Б., Амбарцумян С.М., Анашкин С.Н., Аристова Н.А., Арчакова З.Н., Базурина Е.Я.,

- Батраков В.П., Белоусов Н.Н., Боровских С.Н. и др. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник. Под ред. Ф.И. Квасова, И.Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1984.
- Alieva S.G., Al'tman M.B., Ambarcumjan S.M., Anan'in S.N., Aristova N.A., Archakova Z.N., Bazurina E.Ja., Batrakov V.P., Belousov N.N., Borovskih S.N. et al. Industrial aluminum alloys: Handbook (Ed. Ph.I. Kvasov, I.N. Fridlyander). Moscow: Metallurgiya, 1984 (In Russ.).
6. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение): Справочник. Под ред. И.Н. Фридляндера. Киев: КОМИНТЕХ, 2005.
Beletskiy V.M., Krivov G.A. Aluminum alloys (Composition, properties, technology, application). Handbook. (Ed. I.N. Fridlyander). Kiev: KOMINTEKH, 2005 (In Russ.).
 7. Потапов И.Н., Полухин П.И. Технология винтовой прокатки. М.: Металлургия, 1990.
Potapov I.N., Polukhin P.I. Helical rolling technology. Moscow: Metallurgiya, 1990 (In Russ.).
 8. Romantsev B.A., Galkin S.P., Mikhajlov V.K., Khloponin V.N., Koryshev A.N. Bar micromill. *Steel Trans.* 1995. No. 2. P. 40—42.
 9. Galkin S.P. Trajectory of deformed metal as basis for controlling the radial-shift and screw rolling. *Steel Trans.* 2004. No. 7. P. 63—66.
 10. Galkin S.P., Romantsev B.A., Kharitonov E.A. Putting into practice innovative potential in the universal radial-shear rolling process. *CIS Iron Steel Rev.* 2014. No. 9. P. 35—39.
 11. Вольратх К. Производство круглого проката с использованием трехвалковых станов. *Черные металлы.* 2004. No. 12. С. 23—24.
Volrath K. Production of round steel using three-roll mills. *Chernye Metally.* 2004. No. 12. P. 23—24 (In Russ.).
 12. Нуссбаум Г., Крэмер В., Биттнер Г., Шнель Г. Опыт и результаты эксплуатации трехвалкового редуциционно-калибровочного блока. *Черные металлы.* 2007. No. 1. С. 37—43.
Nussbaum G., Kramer V., Bittner G., Shnel G. Experience and results of operation of a three-roll reduction and calibration unit. *Chernye Metally.* 2007. No. 1. P. 37—43 (In Russ.).
 13. Радюченко Ю.С. Ротационная ковка. М.: ГНТИ, Машлит, 1962.
Radyuchenko Yu.S. Rotary forging. Moscow: GNTI, Mashlit, 1962 (In Russ.).
 14. Andreev V.A., Yusupov V.S., Perkas M.M., Prosvirnin V.V., Shelest, A.E., Prokoshkin S.D., Khmelevskaya I.Y., Korotitskii A.V., Bondareva S.A., Karelin R.D. Mechanical and functional properties of commercial alloy TN-1 semiproducts fabricated by warm rotary forging and ECAP. *Russ. Metall.* 2017. Vol. 2017. No. 10. P. 890—894. DOI: 10.1134/S0036029517100020.
 15. Галкин С.П., Гамин Ю.В., Алещенко А.С., Романцев Б.А. Современное развитие элементов теории, технологии и мини-станов радиально-сдвиговой прокатки. *Черные металлы.* 2021. No. 12. С. 51—58. DOI: 10.17580/chm.2021.12.09.
Galkin S.P., Gamin Yu.V., Aleshchenko A.S., Romantsev B.A. Modern development of elements of theory, technology and mini-mills of radial shear rolling. *Chernye Metally.* 2021. No. 12. P. 51—58 (In Russ.).
 16. Суан Та.Д., Шереметьев В.А., Комаров В.С., Кудряшова А.А., Галкин С.П., Андреев В.А., Прокошкин С.Д., Браиловский В. Сравнительное исследование горячей радиально-сдвиговой прокатки заготовок из сверхупругого сплава системы Ti—Zr—Nb и серийного сплава ВТ6 методом QForm-моделирования. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2020. No. 6. С. 32—43. DOI: 10.17073/0021-3438-2020-6-32-43.
Xuan T.D., Sheremetyev V.A., Komarov V.S., Kudryashova A.A., Galkin S.P., Andreev V.A., Prokoshkin S.D., Brailovski V. Comparative study of superelastic Ti—Zr—Nb and commercial VT6 alloy billets by QForm simulation. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2021. No. 62. P. 39—47. DOI: 10.3103/S1067821221010168.
 17. Гамин Ю.В., Кошмин А.Н., Долбачев А.П., Галкин С.П., Алещенко А.С., Кадач М.В. Изучение влияния режимов радиально-сдвиговой прокатки на температурно-деформационные условия процесса обработки алюминия АД0. *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2020. No. 5. С. 70—83. DOI: 10.17073/0021-3438-2020-5-70-83.
Gamin Y.V., Koshmin A.N., Dolbachev A.P., Galkin S.P., Aleshchenko A.S., Kadach M.V. Studying the influence of radial-shear rolling on thermal deformation conditions of A1050 processing. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2020. No. 61. P. 646—657. DOI: 10.3103/S1067821220060085.
 18. Arbuz A., Kawalek A., Ozhmegov K., Dyja H., Panin E., Lepsibayev A., Sultanbekov S., Shamenova R. Using of radial-shear rolling to improve the structure and radiation resistance of zirconium-based alloys. *Materials.* 2020. Vol. 13. No. 19. Art. 4306. DOI: 10.3390/ma13194306.
 19. Валеев И.Ш., Валеева А.Х. Изменение микротвердости и микроструктуры меди М1 при радиально-сдвиговой прокатке. *Письма о материалах.* 2013. Т. 3. No. 1 (9). С. 38—40.
Valeev I.Sh., Valeeva A.Kh. Change in microhardness and microstructure of copper M1 during radial-shear rolling. *Pis'ma o materialakh.* 2013. Vol. 3. No. 1 (9). P. 38—40 (In Russ.).

20. Dobatkin S., Galkin S., Estrin Y., Serebryany V., Diez M., Martynenko N., Lukyanova E., Perezhogin V. Grain refinement, texture, and mechanical properties of a magnesium alloy after radial-shear rolling. *J. Alloys Compd.* 2019. Vol. 774. P. 969–979. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.09.065.
21. Stefanik A., Szota P., Mróz S., Bajor T., Dyja H. Properties of the AZ31 magnesium alloy round bars obtained in different rolling processes. *Arch. Metall. Mater.* 2015. No. 60 (4). P. 3002–3005. DOI: 10.1515/amm-2015-0479.
22. Akopyan T.K., Gamin Y.V., Galkin S.P., Prosviryakov A.S., Aleshchenko A.S., Noshin M.A., Koshmin A.N., Fomin A.V. Radial-shear rolling of high-strength aluminum alloys: Finite element simulation and analysis of microstructure and mechanical properties. *Mater. Sci. Eng. A.* 2020. Vol. 786. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139424.
23. Gamin Y.V., Galkin S.P., Romantsev B.A., Koshmin A.N., Goncharuk A.V., Kadach M.V. Influence of radial-shear rolling conditions on the metal consumption rate and properties of D16 aluminum alloy rods. *Metallurgist.* 2021. No. 65. P. 650–659. DOI: 10.1007/s11015-021-01202-0/
24. Naydenkin E.V., Ratochka I.V., Mishin I.P., Lykova O.N. Evolution of the structural-phase state of a VT22 titanium alloy during helical rolling and subsequent aging. *Russ. Phys. J.* 2015. No. 58(8). P. 1068–1073. DOI: 10.1007/s11182-015-0613-7.
25. Valeeva A.Kh., Valeev I.Sh., Fazlyakhmetov R.F. Microstructure of the β -phase in the $\text{Sn}_{11}\text{Sb}_{5.5}\text{Cu}$ babbitt. *Phys. Metals Metallograf.* 2017. Vol. 118. No. 1. P. 48–51. DOI: 10.1134/S0031918X17010082.
26. Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Dyja H., Bajor T., Tsay K., Arbuz A., Gusseyinov N., Nemkaeva R. The effect of cross rolling on the microstructure of ferrous and non-ferrous metals and alloys. *Metallurgiya.* 2017. Vol. 56. No. 1-2. P. 199–202.
27. Karpov B.V., Patrin P.V., Galkin S.P., Kharitonov E.A., Karpov I.B. Radial-shear Rolling of titanium alloy VT-8 bars with controlled structure for small diameter ingots (≤ 200 mm). *Metallurgist.* 2018. Vol. 61. No. 9-10. P. 884–890. DOI: 10.1007/s11015-018-0581-6.
28. Патрин П.В., Карпов Б.В., Алещенко А.С., Галкин С.П. Оценка технологических возможностей радиально-сдвиговой прокатки сортового проката из жаропрочного сплава ХН73МБТЮ. *Сталь.* 2020. No. 1. С. 18–21.
Patrin P.V., Karpov B.V., Aleshchenko A.S., Galkin S.P. Capability process assessment of radial-displacement rolling of heat-resistant alloy HN73MBTYU. *Steel Trans.* 2020. Vol. 50. No 1. P. 42–45.