

НОВЫЙ ВЫСОКОПРОЧНЫЙ АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

© 2024

- М. А. Барыкин** аспирант, инженер научного проекта;
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», Москва;
mr.barykin97.97@mail.ru
- Е. А. Наумова** доцент, ведущий эксперт научного проекта;
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», Москва;
jan73@mail.ru
- Н. А. Белов** доктор технических наук, главный научный сотрудник
кафедры обработки металлов давлением;
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», Москва;
nikolay-belov@yandex.ru
- А. С. Финогеев** аспирант, инженер научного проекта кафедры обработки
металлов давлением;
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», Москва;
начальник центральной заводской лаборатории;
АО «Завод алюминиевых сплавов», Москва;
finogeev@zaspl.ru
- А. Н. Кошмин** доцент сектора научной деятельности;
Московский политехнический университет;
доцент кафедры обработки металлов давлением;
Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС», Москва;
koshmin.an@misis.ru

Представлены результаты исследований шести сплавов системы Al-Ca-Zn-Mg с добавками меди, марганца, железа и кремния с целью моделирования состава сплава, приготовленного на основе вторичного алюминия. Сплавы изготавливались в виде слитков размером 140×200×20 мм, которые подвергали последующей деформационной обработке методом горячей прокатки с толщины 20 мм до толщины 1 мм, а затем получали холоднокатаные листы толщиной 0,5 мм. Также изготавливался слиток цилиндрической формы диаметром 40 мм и длиной 200 мм, из которого получали прутки диаметром 14 мм методом радиально-сдвиговой прокатки. Горячую деформационную обработку слитков проводили при температуре 450°C без предварительного гомогенизационного отжига. Литые и деформированные образцы исследовали с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии. В микроструктуре образцов не было обнаружено грубых игольчатых частиц железо- и кремнийсодержащих фаз, а также каких-либо других грубых интерметаллидов, несмотря на высокое содержание примесей. Проведены механические испытания методом одноосного растяжения деформированных полуфабрикатов, которые не подвергались дополнительной упрочняющей термической обработке. По результатам испытаний был выбран сплав оптимального состава. Установлена возможность получения изделий из высокопрочного и высокотехнологичного алюминиево-кальциевого сплава на основе вторичного сырья без использования гомогенизации и закалки.

Вторичный алюминий; горячая прокатка; радиально-сдвиговая прокатка; гомогенизационный отжиг; упрочняющая термическая обработка; механические свойства; микроструктура

Цитирование: Барыкин М.А., Наумова Е.А., Белов Н.А., Финогеев А.С., Кошмин А.Н. Новый высокопрочный алюминиевый сплав на основе вторичного сырья // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2024. Т. 23, № 1. С. 147-159. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-147-159

Введение

В настоящее время для производителей металлопродукции наиболее остро стоит вопрос рециклинга, поскольку это необходимо как по экономическим соображениям, так и из-за ужесточения требований к защите окружающей среды [1]. Поэтому необходимы новые подходы к дизайну сплавов, изготавливаемых с использованием вторичного сырья.

Новые виды техники требуют применения сплавов с улучшенным комплексом свойств. Алюминиевые сплавы, легированные цинком и магнием, относятся к сплавам 7-тысячной серии и являются наиболее прочными [2 – 4]. В частности, сплав 7005 после некоторых видов термомеханической обработки обладает пределом прочности, равным 350 МПа [5 – 9]. В то же время у сплавов 7-тысячной серии есть ряд существенных недостатков, основным из которых является чувствительность к чистоте исходного сырья, что в свою очередь повышает себестоимость изделий из сплавов этой серии.

Таким образом, задача эффективного использования вторичного сырья для получения полуфабрикатов из алюминиевых сплавов по уровню свойств не хуже, чем у «первичных» сплавов, весьма актуальна. Вторичное алюминиевое сырьё содержит все основные элементы, которыми легируют марочные сплавы (Cu, Si, Mg, Zn, Mn), что позволяет уменьшать количество легирующих добавок и снизить стоимость приготовления сплавов (в том числе за счёт сокращения времени плавки) [10].

Использование вторичного сырья уже нашло достаточно большое применение для производства сплавов 6-тысячной группы на основе системы Al-Mg-Si [11], в частности марок АД31 (6063) и АД35 (6082). Однако для достижения высокого уровня технологичности и физико-механических характеристик для сплавов 6-тысячной группы требуется обязательное использование операций гомогенизации (для слитков) и закалки (для деформированных полуфабрикатов), что усложняет и удорожает технологический цикл. С другой стороны, в последние годы появилось значительное количество публикаций об исследованиях алюминиевых сплавов, легированных кальцием [12 – 16]. Некоторые из этих сплавов достигают высокого уровня прочностных свойств без использования гомогенизации и закалки, в частности, речь идёт об алюминий-кальциевых сплавах, легированных цинком и магнием. В исследовании авторов [17] в пример приводится сплав, содержащий до 6,5% Zn, до 1,5% Ca, до 2% Mg и до 0,8% Fe. Он предназначен для получения отливок, и его предел прочности без использования операции закалки составляет 330 МПа, а относительное удлинение 4%. Но кроме железа никаких дополнительных примесей в этом сплаве не содержится, а значит для его производства ограничено использование вторичного сырья. В работах [13; 15; 16] было установлено, что кальций связывает железо, марганец и кремний в тройные фазы, которые имеют компактную форму и не оказывают негативного влияния на механические свойства сплавов.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности использования вторичного сырья для производства алюминий-кальциевых сплавов с повышенными механическими характеристиками. Для этого было необходимо с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии исследовать структуру и фазовый состав экспериментальных композиций с повышенным содержанием железа, кремния, меди и марганца, а также провести термомеханическую обработку этих сплавов и определить их механические свойства.

Экспериментальные методики

Были выплавлены 6 сплавов в виде плоских слитков размером 140×200×20 мм. Составы представлены в табл. 1. Выплавка слитков производилась в электрической печи сопротивления графито-шамотных тиглях на основе лома и отходов алюминиевых сплавов (их доля была не менее 90%) при дошихтовке металлическим кальцием. Литье осуществлялось в графитовую изложницу.

Таблица 1. Составы экспериментальных сплавов

№	Концентрации, масс. %							
	Zn	Mg	Ca	Fe	Si	Cu	Mn	Al
1	4,0	1,0	0,8	0,2	0,05	0,05	0,05	ост.
2	5,6	1,6	1,2	0,6	0,05	0,05	0,05	ост.
3	5,0	1,3	1,0	0,5	0,2	0,2	0,2	ост.
4	5,8	1,2	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3	ост.
5	7,0	2,5	2,0	1,0	0,5	0,5	0,5	ост.
6*	6,5	2,0	1,5	0,8	-	-	-	ост.

*Сплав для сравнения [17]

Скорость охлаждения сплавов составила 10°С/с, что соответствует скорости при получении среднеразмерных слитков методом непрерывного литья (в частности, цилиндрических слитков диаметром 100...200 мм) [18]. Также был изготовлен цилиндрический слиток из сплава 3 диаметром 40 мм и длиной 200 мм.

Горячую прокатку осуществляли при температуре 450°С на лабораторном стане «ДУО 210». Были получены горячекатаные листы толщиной 1 мм. Далее эти листы прокатывали методом холодной прокатки до толщины 0,5 мм на лабораторных вальцах «LM 120» с последующим отжигом в печи сопротивления SNOL8,2/1100 при температуре 400°С в течение одного часа.

В свою очередь цилиндрический слиток был подвергнут радиально-сдвиговой прокатке (РСП) на министане винтовой прокатки «МИСиС 14–40», сконструированном для получения горячекатаных прутков размером от 14 до 40 мм [19]. В результате прокатки были получены горячекатаные образцы в виде цилиндрических прутков диаметром 14 мм.

Микроструктура литых образцов изучалась с помощью оптического микроскопа Olympus GX51 (ОМ) и сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 (СЭМ). Микроскоп TESCAN, укомплектованный энергодисперсионной приставкой-микроанализатором производства Oxford Instruments и программным обеспечением AZtec, также использовали для микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Для приготовления шлифов использовали как механическую, так и электролитическую полировку. Последнюю проводили в электролите, содержащем 6 частей C₂H₅ОН, 1 часть HClO₄ и 1 часть глицерина, при напряжении 12 В. Испытание на растяжение проводили на универсальной машине INSTRON при скорости нагружения 10 мм/мин [20].

Результаты и обсуждение

Выбор составов сплавов был продиктован следующими соображениями. Диапазоны концентраций цинка и магния обосновываются необходимостью обеспечения в условиях литья среднеразмерных слитков (в частности, цилиндрических диаметром 100...200 мм) достаточного содержания этих элементов в твёрдом алюминиевом растворе (далее (Al)): не менее 3% Zn и не менее 1% Mg. Концентрации цинка в сплаве менее 4 мас.% будет недостаточно для обеспечения высоких механических свойств.

Концентрация магния в сплаве ниже 1,0 мас.% приведёт к снижению механических свойств из-за уменьшения его количества в алюминиевом твёрдом растворе в процессе кристаллизации. Концентрация цинка более 7% и магния более 2,5% может заметно ухудшить литейные свойства из-за увеличения интервала кристаллизации (рис. 1, а, б). Концентрация кальция ниже 0,8 мас.% будет недостаточной для полного связывания железа в эвтектические тройные соединения, входящие в дисперсную эвтектику $[(Al)+Al_4Ca+Al_{10}CaFe_2]$ [16]. Концентрация кальция выше 1,2 мас.% приведёт к излишне высокому количеству эвтектики $[(Al)+(Al,Zn)_4Ca]$, что может сказаться на уменьшении количества цинка в алюминиевом твёрдом растворе и снижению деформационной пластичности (рис. 1, в).

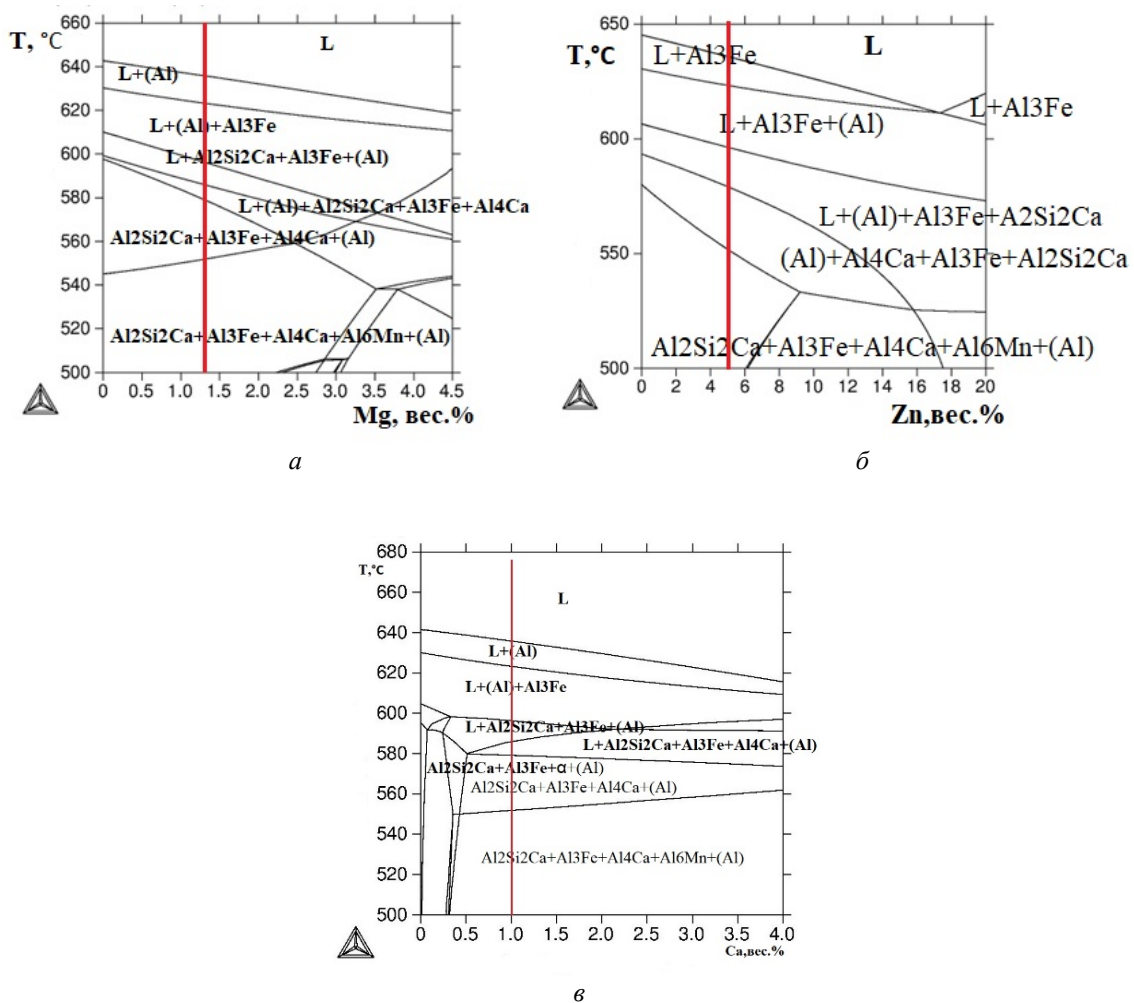


Рис. 1. Политермические сечения системы Al – Zn – Mg – Ca – Fe – Si – Cu – Mn при 5% Zn, 1,3% Mg, 1% Ca, 0,5% Fe, 0,2% Si, 0,2% Cu, 0,2% Mn: а – переменное содержание Mg; б – переменное содержание Zn; в – переменное содержание Ca

Концентрации железа, кремния, меди и марганца менее указанных значений приводят к формированию недостаточного количества эвтектики и, как следствие, к снижению технологичности при литье слитков. К тому же достижение таких концентраций возможно лишь при использовании дорогостоящего сырья высокой чистоты. Концентрация данных элементов выше указанных значений приведёт к огрублению структуры, что отрицательно скажется на механических свойствах и деформационной пла-

стичности при обработке давлением (в частности, при прокатке и прессовании). Шестой сплав (табл. 1) был взят в качестве базы для сравнения из работы [17].

Полученные слитки без предварительной гомогенизации были подвергнуты горячей прокатке при 450°C до толщины 1 мм. Сплавы 1 – 4 проявили хорошую деформационную технологичность, отсутствовали видимые и микроструктурные дефекты. Сплавы 5 и 6 были разрушены в процессе прокатки и в дальнейшем исследовании мы их не рассматривали.

Концентрация цинка выше 5,8 мас.% привела к излишне высокому количеству эвтектики $[(Al)+(Al,Zn)_4Ca]$, что сказалось на формировании иглообразных включений фазы Al_3Fe за счёт меньшего количества эвтектики $[(Al)+Al_4Ca+Al_{10}CaFe_2]$. Также из-за содержания магния выше 1,6 мас.% в сплавах присутствовало повышенное количество фазы $\Gamma (Al_2Mg_3Zn_3)$, что привело к снижению механических свойств.

На рис. 2 представлены структуры экспериментальных сплавов 1 – 4 в литом состоянии. Все структуры доэвтектические, состоящие из первичных кристаллов алюминиевого твёрдого раствора и тонких прожилок эвтектической составляющей.

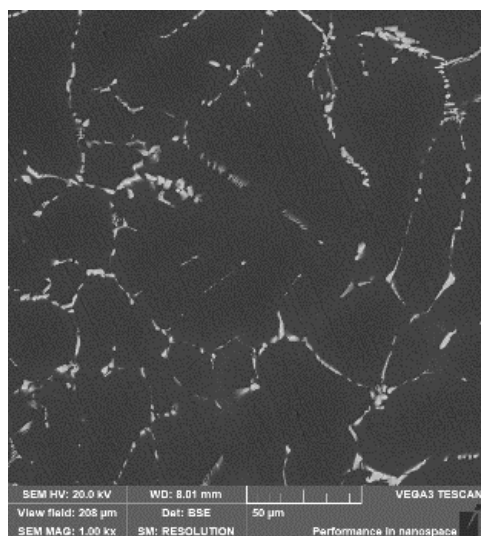
На картах распределения элементов в сплаве 3 (рис. 3) видно, что магний и марганец равномерно распределены в объёме, поскольку магний находится в алюминиевом твёрдом растворе, как в первичных кристаллах, так и в эвтектических, а марганец растворяется в алюминиевом твёрдом растворе и образует фазу эвтектического происхождения $Al_{10}CaMn_2$ [13]. Практически вся медь входит в алюминиевый твёрдый раствор. По данным МРСА её содержание варьируется от 0,04 до 0,12%, своих фаз при таком её содержании в сплаве она не образует. Но, согласно данным [21], медь частично может растворяться в фазе Al_4Ca , замещая атомы алюминия с образованием соединения $Al_4(Ca,Cu)$. Кальций, цинк и железо сконцентрированы в эвтектике, при этом цинк частично растворён в алюминиевом твёрдом растворе и частично в фазе Al_4Ca , образуя соединение $(Al,Zn)_4Ca$. Поскольку в эвтектике не наблюдается грубых фаз, все фазы имеют компактную морфологию, то можно предположить, что железо образует тройное соединение $Al_{10}CaFe_2$, а кремний – соединение Al_2CaSi_2 , согласно данным [15; 16]. Последнее соединение присутствует в термодинамической базе данных Thermo-Calc, что отражено на рис. 1.

Сплавы 1 – 4 (табл. 1) показали высокую технологичность во время деформационной обработки (рис. 4, а). После прокатки горячекатаных листов были проведены металлографический и фрактографический анализы, а также вырезаны образцы для испытания на одноосное растяжение. На фотографии структуры (рис. 4, б) видно, что эвтектика вытянулась в направлении прокатки, а также истончилась в поперечном направлении, что, в свою очередь, подтверждает высокую пластичность интерметаллидных фаз эвтектического происхождения. Излом образцов – мелкокристаллический с заметным преобладанием вязкой составляющей (рис. 4, в). Механические свойства прокатанных образцов представлены в табл. 2.

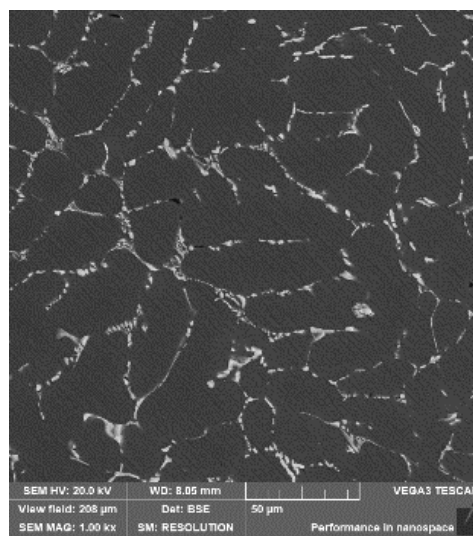
Исходя из данных табл. 2 можно сделать вывод, что сплавы 2 – 4 имеют достаточно высокие значения прочности и пластичности, и особенно хорошим сочетанием свойств обладают листы из сплава 3. У сплава 1 недостаточно высокая прочность, что, по-видимому, связано с малыми концентрациями цинка и магния в алюминиевом твёрдом растворе. Листы из сплавов 2 – 4 были прокатаны в холодную с толщины 1 мм до 0,5 мм. Холоднокатаные листы отжигали при температуре 400°C в течение одного часа. В табл. 2 приведены их свойства.

Таблица 2. Характеристика экспериментальных сплавов в виде горячекатаных образцов (толщина 1 мм) и холоднокатаных образцов (толщина 0,5 мм) при 20°C

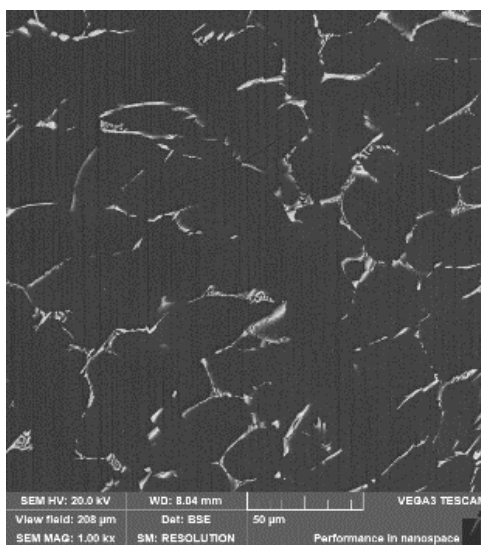
№	Горячекатаные листы		Холоднокатаные листы	
	σ_b , МПа	δ , %	σ_b , МПа	δ , %
1	246	10,6	—	—
2	376	6,4	366	5,8
3	386	9,1	370	7,5
4	373	8,5	354	5,6



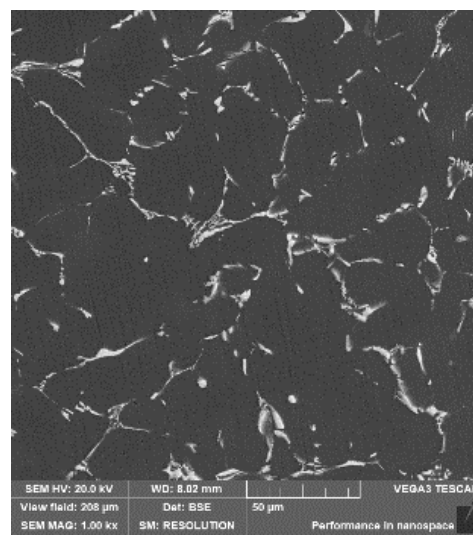
а



б



в



г

Рис. 2. Микроструктура сплавов в литом состоянии:
 а – сплав 1; б – сплав 2; в – сплав 3; г – сплав 4 (см. табл. 1)

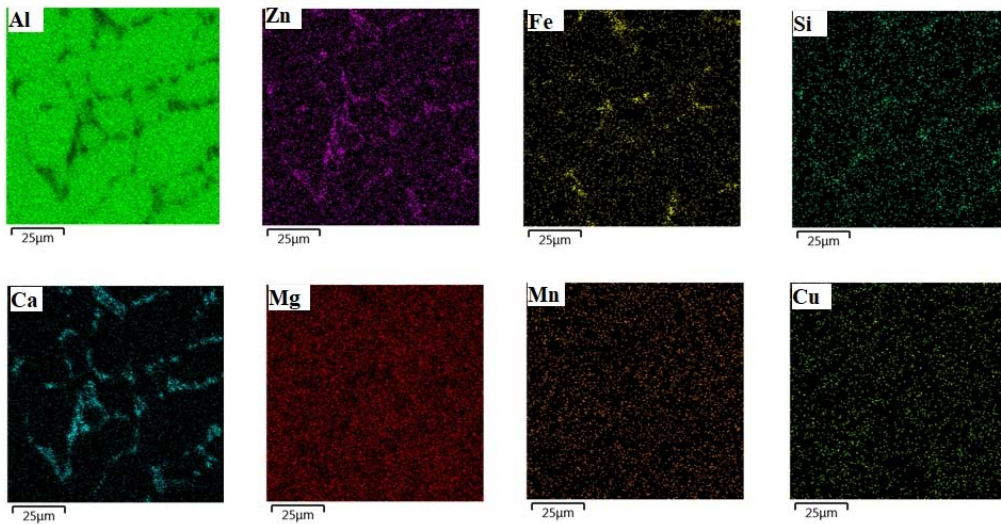


Рис. 3. Карты распределения элементов в сплаве 3

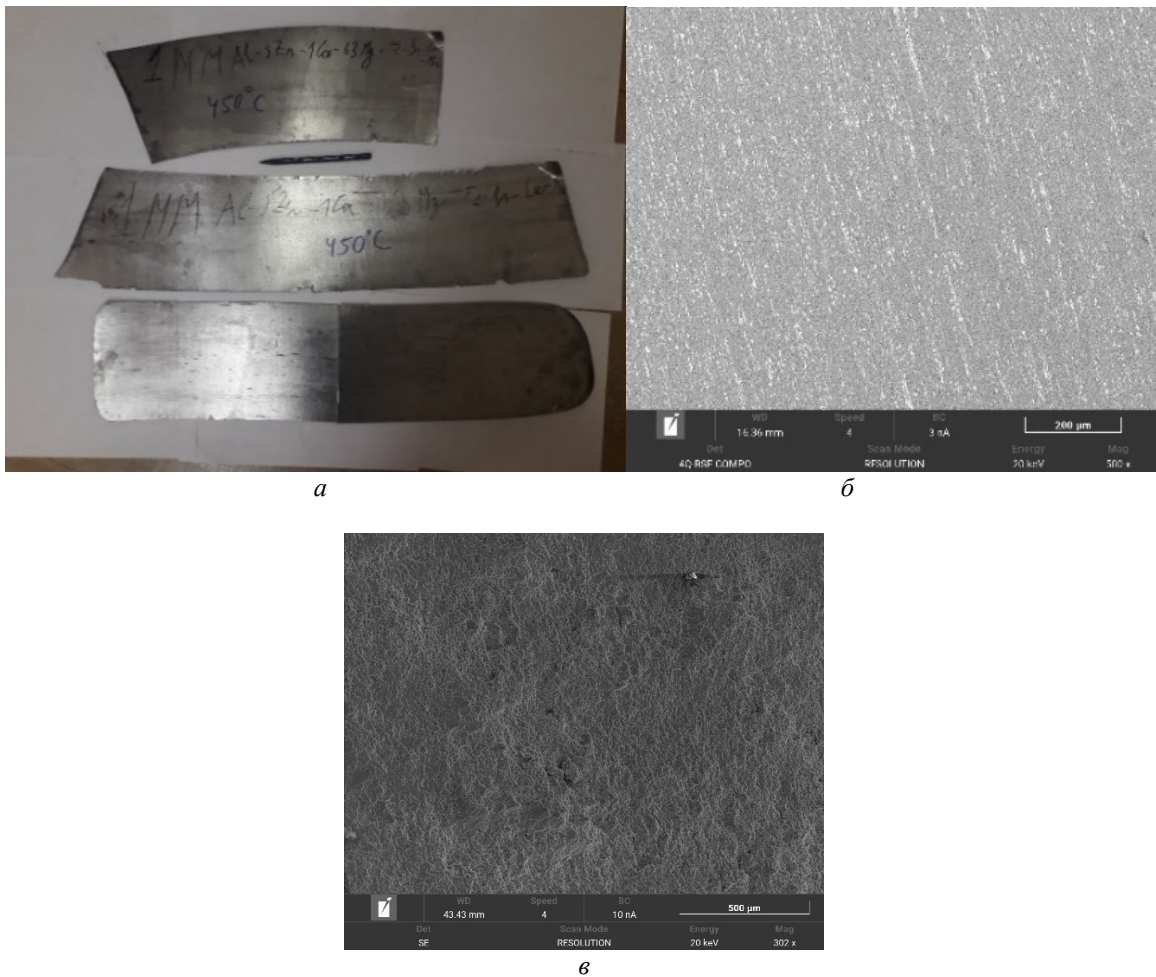


Рис. 4. Горячекатаные листы:
а – горячекатаные листы из сплава 3; б – микроструктура горячекатаных листов из сплава 3;
в – структура излома образца из сплава 3

По результатам механических испытаний можно сделать вывод, что наилучшему комплексу механических свойств отвечает сплав 3, поэтому в дальнейших исследованиях участвовал именно этот состав.

В ходе дальнейшего эксперимента из сплава 3 был изготовлен цилиндрический слиток диаметром 40 мм и прокатан методом радиально-сдвиговой прокатки (РСП) при температуре 450°C. Полученный пруток имел диаметр 14 мм (рис. 4, а). В дальнейшем РСП-прутки исследовались на предмет механических свойств методом одноосного растяжения, а также проводился анализ микроструктуры прутков (рис. 4, б) и его изломов после испытания на одноосное растяжение (рис. 4, в).

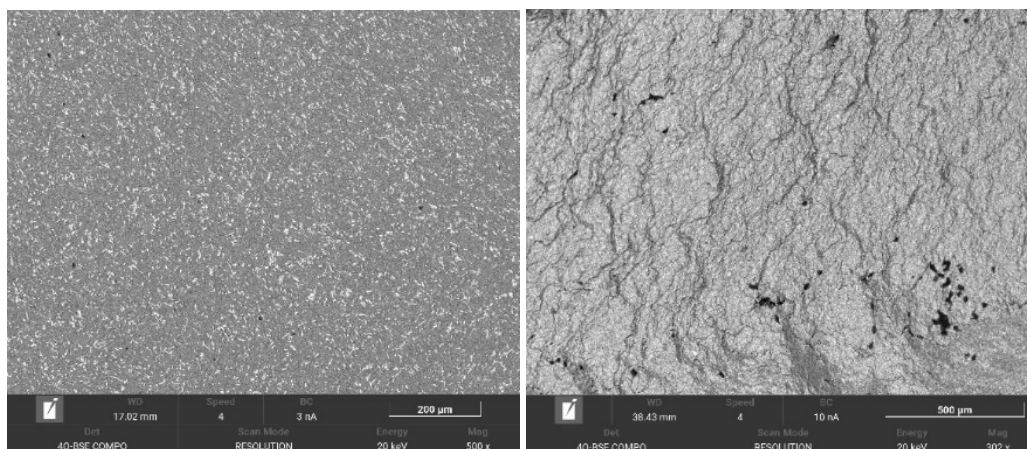
По фотографии микроструктуры (рис. 4, б) РСП-прутка можно сказать, что во время деформационной обработки эвтектические интерметаллиды раздробились и приобрели мелкодисперсную глобулярную форму. Такая морфология фаз обеспечивает повышенную пластичность и отсутствие концентраторов напряжений. По виду излома прутка после одноосного растяжения (рис. 4, в) можно сказать, что он достаточно вязкий, на фотографии явно видны следы течения металла под нагрузкой. Результаты механических испытаний прутков из сплава 3 представлены в табл. 4.

Таблица 4. Прочностные характеристики экспериментального сплава 3 в виде РСП-прутков (при 20°C)

Вид полуфабриката	σ_B , МПа	δ , %
РСП-пруток (диаметр 14 мм)	320	5,5



а



б

в

Рис. 5. РСП-прутки диаметром 14 мм из сплава 3:
 а – внешний вид; б – микроструктура прутка; в – излом прутка

Из анализа результатов механических испытаний видно, что РСП-прутки обладают достаточно высокими механическими свойствами, соответствующими интервалу характеристик высокопрочных сплавов. Механические свойства могли бы быть выше при условии предварительной механической обработки слитков, а именно, обточке верхнего дефектного слоя. В таком случае структура РСП-прутка была бы менее засорена инородными включениями и содержала бы меньше иных дефектов, подобных тем, что видны в изломе (рис. 4, в).

Таким образом, в ходе работы было установлено, что оптимальным комплексом свойств обладает сплав состава 3 (Al-5Zn-1,3Mg-1Ca-0,5Fe-0,2Si-0,2Cu-0,2Mn). С помощью МРСА было определено, что в состав алюминиевого твёрдого раствора этого сплава в литом состоянии входит 3,67...5,07% Zn; 0,97...1,28% Mg (в зависимости от спектра), а значит после термомеханической обработки достигается хороший уровень дисперсионного упрочнения без использования операции закалки, в основном за счёт выделения фаз $MgZn_2$ и T ($Al_2Mg_3Zn_3$).

Выводы

Исследованы фазовый состав, структура и механические свойства шести алюминиевых сплавов, содержащих в качестве основных компонентов цинк, магний и кальций, приготовленных на основе лома и отходов, в литом и деформированном состояниях.

Были получены горячекатаные листы толщиной 1 мм из четырёх, не разрушившихся в процессе прокатки сплавов, имеющие пределы прочности при комнатной температуре на уровне 370...380 МПа и относительное удлинение на уровне 6...9%. Из горячекатаных листов были получены листы толщиной 0,5 мм с помощью холодной прокатки, которые имели пределы прочности на уровне 350...370 МПа и относительное удлинение от 5 до 7%.

В результате анализа структуры и свойств листовых образцов был выбран сплав оптимального состава Al-5Zn-1,3Mg-1Ca-0,5Fe-0,2Si-0,2Cu-0,2Mn и из него методом радиально-сдвиговой прокатки получены прутки диаметром 14 мм с пределом прочности при комнатной температуре 320 МПа и относительным удлинением 5,5%.

Было установлено, что в состав твёрдого раствора сплава оптимального состава входит не менее 3% цинка и не менее 1% магния, что обеспечивает высокие механические свойства после термомеханической обработки без использования операции закалки. Попадающие в сплав примеси железа, кремния, меди и марганца либо входят в состав твёрдого раствора и алюминиево-кальциевой фазы (медь), либо образуют тройные интерметаллиды компактной формы, входящие в состав многокомпонентных эвтектик (железо, кремний, марганец).

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 20-19-00746-П.

Библиографический список

1. Fielding R.A.P. Recycling Aluminum: Especially processing extrusion scrap // Light Metal Age. 2005. P. 20-35.
2. Ibrahim M.F., Garza-Elizondo G.H., Samuel A.M., Samuel F.H. Optimizing the heat treatment of high-strength 7075-type wrought alloys: A metallographic study // International Journal of Metalcasting. 2016. V. 10, Iss. 3. P. 264-275. DOI: 10.1007/s40962-016-0038-2

3. Vakhromov R.O., Antipov V.V., Tkachenko E.A. Research and development of high-strength of Al-Zn-Mg-Cu alloys // Proceedings of 13th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA 13). 2012. P. 1515-1520. DOI: 10.1007/978-3-319-48761-8_228
4. Lu X.Y., Guo E.J., Rometsch P., Wang L. Effect of one-step and two-step homogenization treatments of distribution of Al₃Zr dispersoids in commercial AA7150 aluminium alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2012. V. 22, Iss. 11. P. 2645-2651. DOI: 10.1016/s1003-6326(11)61512-4
5. Wang M., Jin P., Wang J., Han Li. Hot deformation behavior of as-quenched 7005 aluminum alloy // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. V. 24, Iss. 9. P. 2796-2804. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63411-7
6. Hou J., Deng P., Wang S., Xu H., Shi Y. Study on formability and microstructure evolution of hot deep drawing manufactured 7005 aluminum alloy sheet metal // Materials Today Communications. 2023. V. 36. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106794
7. Jiang J., Wang Y., Liu Y., Xiao G., Li H. Microstructure and mechanical properties of 7005 aluminum alloy processed by one-pass equal channel reciprocating extrusion // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2021. V. 31, Iss. 3. P. 609-625. DOI: 10.1016/S1003-6326(21)65523-1
8. Li L., Wang G., Liu J., Yao Z. Flow softening behavior and microstructure evolution of Al-5Zn-2Mg aluminum alloy during dynamic recovery // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2014. V. 24, Iss. 1. P. 42-48. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63026-0
9. Xu C., He H., Xue Zh., Li L. A detailed investigation on the grain structure evolution of AA7005 aluminum alloy during hot deformation // Materials Characterization. 2021. V. 171. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110801
10. Padamata S.K., Yasinskiy A., Polyakov P. A Review of secondary aluminum production and its byproducts // JOM. 2021. V. 73, Iss. 9. P. 2603-2614. DOI: 10.1007/s11837-021-04802-y
11. Whalen S., Overman N., Taysom B.S., Bowden M., Reza-E-Rabby M., Skszek T., DiCiano M. Effect of high iron content on direct recycling of unhomogenized aluminum 6063 scrap by shear assisted processing and extrusion // Journal of Manufacturing Processes. 2023. V. 97. P. 115-124. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.04.067
12. Belov N., Naumova E., Akopyan T. Eutectic alloys based on the Al-Zn-Mg-Ca system: Microstructure, phase composition and hardening // Materials Science and Technology. 2017. V. 33, Iss. 6. P. 656-666. DOI: 10.1080/02670836.2016.1229847
13. Naumova E., Doroshenko V., Barykin M., Sviridova T., Lyasnikova A., Shurkin P. Hypereutectic Al-Ca-Mn-(Ni) alloys as natural eutectic composites // Metals. 2021. V. 11, Iss. 6. DOI: 10.3390/met11060890
14. Belov N.A., Naumova E.A., Akopyan T.K., Doroshenko V.V. Design of multicomponent aluminium alloy containing 2 wt% Ca and 0.1 wt% Sc for cast products // Journal of Alloys and Compounds. 2018. V. 762. P. 528-536. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.05.281
15. Шуркин П.К., Белов Н.А., Мусин А.Ф., Самошина М.Е. Влияние кальция и кремния на характер кристаллизации и упрочнение сплава Al-8% Zn-3% Mg // Физика металлов и металловедение. 2020. Т. 121, № 2. P. 149-156. DOI: 10.31857/S0015323020020151
16. Шуркин П.К., Белов Н.А., Мусин А.Ф., Аксенов А.А. Новый высокопрочный литейный алюминиевый сплав на основе системы Al-Zn-Mg-Ca-Fe, не требующий термообработки // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2020. № 1. P. 48-58. DOI: 10.17073/0021-3438-2020-1-48-58

17. Шуркин П.К., Долбачев А.П., Наумова Е.А., Дорошенко В.В. Влияние железа на структуру, упрочнение и физические свойства сплавов системы Al-Zn-Mg-Ca // Цветные металлы. 2018. № 5. С. 69-77. DOI: 10.17580/tsm.2018.05.10

18. Polmear I.J. Light metals: From traditional alloys to nanocrystals. Elsevier, 2006. 421 p.

19. Gamin Y.V., Belov N.A., Akopyan T.K., Timofeev V.N., Cherkasov S.O., Motkov M.M. Effect of radial-shear rolling on the structure and hardening of an Al–8%Zn–3.3%Mg–0.8%Ca–1.1%Fe alloy manufactured by electromagnetic casting // Materials. 2023. V. 16, Iss. 2. DOI: 10.3390/ma16020677

20. Abioye O.P., Atanda P.O., Osinkolu G.A., Abioye A.A., Olumor I.D., Odunlami O.A., Afolalu S.A. Influence of equal channel angular extrusion on the tensile behavior of Aluminum 6063 alloy // Procedia Manufacturing. 2019. V. 35. P. 1337-1343. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.05.020

21. Akopyan T.K., Belov N.A., Letyagin N.V., Cherkasov S.O., Nguen X.D. Description of the new eutectic Al-Ca-Cu system in the aluminum corner // Metals. 2023. V. 13, Iss. 4. DOI: 10.3390/met13040802

NEW HIGH-STRENGTH ALUMINUM ALLOY ON THE BASIS OF SECONDARY MATERIALS

© 2024

- M. A. Barykin** Postgraduate Student, Scientific Project Engineer;
National University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russian Federation;
mr.barykin97.97@mail.ru
- E. A. Naumova** Associate Professor, Leading Expert of the Scientific Project;
National University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russian Federation;
jan73@mail.ru
- N. A. Belov** Doctor of Science (Engineering), Chief Researcher of the Department
of Metal Forming;
National University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russian Federation;
nikolay-belov@yandex.ru
- A. S. Finogeev** Postgraduate Student, Engineer of the Scientific Project
of the Department of Metal Forming
National University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russian Federation;
Head of the Central Factory Laboratory;
JSC Aluminum Alloy Plant, Moscow, Russian Federation;
finogeev@zasp1.ru
- A. N. Koshmin** Associate Professor of the Scientific Activity Sector;
Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation;
Associate Professor of the Department of Metal Forming
National University of Science and Technology MISIS,
Moscow, Russian Federation;
koshmin.an@misis.ru

Six alloys of the Al-Ca-Zn-Mg system with additives of copper, manganese, iron and silicon were studied in order to simulate the composition of an alloy prepared on the basis of secondary aluminum. The alloys were made in the form of ingots with dimensions of 140×200×20 mm that were subjected to subsequent deformation treatment by hot rolling from a thickness of 20 mm to a thickness of 1 mm, and then cold-rolled sheets with a thickness of 0.5 mm were obtained from them. A cylindrical ingot with a diameter of 40 mm and a length of 200 mm was also made. Rods with a diameter of 14 mm were obtained from it by radial displacement rolling. Hot deformation treatment of

ingots was carried out at a temperature of 450°C without prior homogenizing annealing. Cast and deformed specimens were examined using optical and scanning electron microscopy. No coarse acicular particles of iron- and silicon-containing phases, as well as any other coarse intermetallics, were found in the microstructure of the specimens. Mechanical tests were carried out using the method of uniaxial tension of deformed semi-finished products that were not subjected to additional strengthening heat treatment. According to the test results, an alloy of optimal composition was selected. The possibility of obtaining products from high-strength and high-tech aluminum-calcium alloy based on secondary raw materials without the use of homogenization and quenching was established.

Secondary aluminum; hot rolling; radial displacement rolling; homogenizing annealing; strengthening heat treatment; mechanical properties; microstructure

Citation: Barykin M.A., Naumova E.A., Belov N.A., Finogeev A.S., Koshmin A.N. New high-strength aluminum alloy on the basis of secondary materials. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2024. V. 23, no. 1. P. 147-159. DOI: 10.18287/2541-7533-2024-23-1-147-159

References

1. Fielding R.A.P. Recycling Aluminum: Especially processing extrusion scrap. *Light Metal Age*. 2005. P. 20-35.
2. Ibrahim M.F., Garza-Elizondo G.H., Samuel A.M., Samuel F.H. Optimizing the heat treatment of high-strength 7075-type wrought alloys: A metallographic study. *International Journal of Metalcasting*. 2016. V. 10, Iss. 3. P. 264-275. DOI: 10.1007/s40962-016-0038-2
3. Vakhromov R.O., Antipov V.V., Tkachenko E.A. Research and development of high-strength of Al-Zn-Mg-Cu alloys. *Proceedings of 13th International Conference on Aluminum Alloys (ICAA 13)*. 2012. P. 1515-1520. DOI: 10.1007/978-3-319-48761-8_228
4. Lu X.Y., Guo E.J., Rometsch P., Wang L. Effect of one-step and two-step homogenization treatments of distribution of Al₃Zr dispersoids in commercial AA7150 aluminium alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2012. V. 22, Iss. 11. P. 2645-2651. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61512-4
5. Wang M., Jin P., Wang J., Han Li. Hot deformation behavior of as-quenched 7005 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. V. 24, Iss. 9. P. 2796-2804. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63411-7
6. Hou J., Deng P., Wang S., Xu H., Shi Y. Study on formability and microstructure evolution of hot deep drawing manufactured 7005 aluminum alloy sheet metal. *Materials Today Communications*. 2023. V. 36. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106794
7. Jiang J., Wang Y., Liu Y., Xiao G., Li H. Microstructure and mechanical properties of 7005 aluminum alloy processed by one-pass equal channel reciprocating extrusion. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2021. V. 31, Iss. 3. P. 609-625. DOI: 10.1016/S1003-6326(21)65523-1
8. Li L., Wang G., Liu J., Yao Z. Flow softening behavior and microstructure evolution of Al-5Zn-2Mg aluminum alloy during dynamic recovery. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2014. V. 24, Iss. 1. P. 42-48. DOI: 10.1016/S1003-6326(14)63026-0
9. Xu C., He H., Xue Zh., Li L. A detailed investigation on the grain structure evolution of AA7005 aluminum alloy during hot deformation. *Materials Characterization*. 2021. V. 171. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110801
10. Padamata S.K., Yasinskiy A., Polyakov P. A Review of secondary aluminum production and its byproducts. *JOM*. 2021. V. 73, Iss. 9. P. 2603-2614. DOI: 10.1007/s11837-021-04802-y
11. Whalen S., Overman N., Taysom B.S., Bowden M., Reza-E-Rabby M., Skaszek T., DiCiano M. Effect of high iron content on direct recycling of unhomogenized aluminum 6063 scrap by shear assisted processing and extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. V. 97. P. 115-124. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.04.067

12. Belov N., Naumova E., Akopyan T. Eutectic alloys based on the Al-Zn-Mg-Ca system: Microstructure, phase composition and hardening. *Materials Science and Technology*. 2017. V. 33, Iss. 6. P. 656-666. DOI: 10.1080/02670836.2016.1229847
13. Naumova E., Doroshenko V., Barykin M., Sviridova T., Lyasnikova A., Shurkin P. Hypereutectic Al-Ca-Mn-(Ni) alloys as natural eutectic composites. *Metals*. 2021. V. 11, Iss. 6. DOI: 10.3390/met11060890
14. Belov N.A., Naumova E.A., Akopyan T.K., Doroshenko V.V. Design of multicomponent aluminium alloy containing 2 wt% Ca and 0.1 wt% Sc for cast products. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. V. 762. P. 528-536. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.05.281
15. Shurkin P.K., Belov N.A., Musin A.F., Samoshina M.E. Effect of calcium and silicon on the character of solidification and strengthening of the Al – 8% Zn – 3% Mg alloy. *Physics of Metals and Metallography*. 2020. V. 121, Iss. 2. P. 135-142. DOI: 10.1134/s0031918x20020155
16. Shurkin P.K., Belov N.A., Musin A.F., Aksenov A.A. Novel high-strength casting Al-Zn-Mg-Ca-Fe aluminum alloy without heat treatment Russian. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2020. V. 61. P. 179-187. DOI: 10.3103/s1067821220020121
17. Shurkin P., Dolbachev A., Naumova E., Doroshenko V. Effect of iron on the structure, hardening and physical properties of the alloys of the Al-Zn-Mg-Ca system. *Tsvetnye Metally*. 2018. No. 5. P. 69-77. (In Russ.). DOI: 10.17580/tsm.2018.05.10
18. Polmear I.J. Light metals: From traditional alloys to nanocrystals. Elsevier, 2006. 421 p.
19. Gamin Y.V., Belov N.A., Akopyan T.K., Timofeev V.N., Cherkasov S.O., Motkov M.M. Effect of radial-shear rolling on the structure and hardening of an Al-8%Zn-3.3%Mg-0.8%Ca-1.1%Fe alloy manufactured by electromagnetic casting. *Materials*. 2023. V. 16, Iss. 2. DOI: 10.3390/ma16020677
20. Abioye O.P., Atanda P.O., Osinkolu G.A., Abioye A.A., Olumor I.D., Odunlami O.A., Afolalu S.A. Influence of equal channel angular extrusion on the tensile behavior of Aluminum 6063 alloy. *Procedia Manufacturing*. 2019. V. 35. P. 1337-1343. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.05.020
21. Akopyan T.K., Belov N.A., Letyagin N.V., Cherkasov S.O., Nguen X.D. Description of the new eutectic Al-Ca-Cu system in the aluminum corner. *Metals*. 2023. V. 13, Iss. 4. DOI: 10.3390/met13040802