

УДК 669.018.292:66.017

Г.Г. Клочков¹, Ю.Ю. Клочкова¹, В.А. Романенко¹

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЕФОРМАЦИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПРЕССОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ СПЛАВА В-1341 СИСТЕМЫ Al–Mg–Si

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-1-1

Приведены результаты исследования влияния температуры деформации на структуру и механические свойства прессованных профилей сплава В-1341 системы Al–Mg–Si, дополнительно легированного малыми добавками кальция, при производстве в промышленных условиях металлургического завода ОАО «КУМЗ». Прессование проводили при низкой (300–350°C) и высокой (450–500°C) температурах. Приведены коррозионные свойства (склонность к межкристаллитной и расслаивающей коррозии) профилей после прессования при разных температурах. Проведено сравнение механических свойств после термической обработки в лабораторных и цеховых условиях.

Ключевые слова: сплав В-1341, Al–Mg–Si, легирование, кальций, температура деформации, прессованные профили, термическая обработка, структура, механические свойства, коррозионная стойкость.

The research results of deformation temperature influence on structure, mechanical and corrosion properties of extruded products of Al–Mg–Si alloy V-1341 additionally doped with small additions of Ca made in industrial-scale production of JSC «KUMW» metallurgical plant are presented. Extrusion is maintained at low (300–350°C) and high (450–500°C) temperatures. Corrosion resistance (intergranular corrosion and layer corrosion) of extruded products is investigated. Comparison of mechanical properties after thermal processing in laboratory and metallurgical workshop conditions is also given.

Keywords: alloy V-1341, Al–Mg–Si system, alloying, calcium, deformation temperature, extrusion products, heat treatment, structure, mechanical properties, corrosion resistance.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Создание конкурентоспособных на мировом рынке изделий авиационной и космической техники и изделий двойного назначения нового поколения требует разработки и освоения промышленного производства новых материалов, в том числе алюминиевых деформируемых сплавов с требуемым комплексом механических, коррозионных и эксплуатационных свойств [1–5].

Сплавы системы Al–Mg–Si обладают высокой технологичностью при прессовании в сочетании с относительно высокой прочностью и высокой коррозионной стойкостью [6, 7] и свариваемости, благодаря чему интерес к ним для применения в авиа- и машиностроении растет год от года [8]. Однако на механические свойства прессованных профилей, помимо других факторов, сильно влияет конечный размер зерна. В частности, локальная рекристаллизация на периферии профиля, известная как крупнокристаллический ободок (ККО), уменьшает ресурсные характеристики (выносливость), а также коррозионную стойкость [9].

В исследованиях различных авторов показано, что причиной образования ККО могут служить как неоднородность химического состава и микрохимия периферийных зон профилей [10], связанные с внутрикристаллической ликвацией марганца (или хрома) [11], так и параметры деформации при прессовании [12], а также проводятся работы по детальному исследованию изменения микроструктуры периферийных зон прессованных полуфабрикатов сплавов системы Al–Mg–Si с целью установления закономерностей периферийной рекристаллизации, роста зерна и образования ККО [13].

При прессовании прямым методом (без смазки контейнера) структура и механические свойства изделий из ряда алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Si могут быть неравномерными по сечению и длине. Это объясняется неравномерным истечением металла в результате влияния большой силы трения между поверхностями слитка и контейнера. Возникает смещение внутренней части слитка относительно наружных слоев и образуются два объема деформации – центральный и периферийный, значительно отличающиеся по характеру и степени деформации. В центральном объеме деформация происходит под действием всестороннего неравномерного сжатия и зерна вытягиваются без разрушения границ. Деформация в периферийном объеме неравномерная и имеет «турбулентный» характер. Физическая степень деформации очень высокая. Распространение зоны этого вида деформации по сечению изделия возрастает с увеличением степени деформации при прессовании: она может занимать все сечение или образовывать ободок, ширина которого уменьшается от пресс-остатка к выходному концу изделия. Ободок также сохраняется в штамповках, изготовленных из прессованной заготовки с ККО. Зона ККО в массивных прессованных изделиях имеет повышенную склонность к образованию трещин при закалке [13].

Сплав В-1341 системы Al–Mg–Si разработан ведущими специалистами-материаловедами ФГУП «ВИАМ» [14, 15]. Листы из него при средней прочности имеют высокую коррозионную стойкость и технологичность при холодном формообразовании, хорошо свариваются. Сплав дополнительно легирован модифицирующими добавками кальция, который измельчает зерно и снижает склонность к образованию горячих трещин, что отражено во многих работах по промышленному освоению и всесторонним исследованиям листов из этого сплава [16–19].

В работах многих авторов [20–23] установлено положительное влияние кальция на структуру, механические свойства, технологичность и свариваемость некоторых алюминиевых сплавов. По мнению других авторов механизм влияния кальция на свойства алюминиевых сплавов определяется системой легирования и является довольно сложным и малоизученным [24]. Но, несмотря на это, в последние годы наблюдается тенденция по введению кальция в качестве легирующего элемента в алюминиевые как деформируемые, так и литейные [25, 26], и магниевые сплавы, о чем свидетельствуют многочисленные работы [27–29].

Благодаря тому, что сплав В-1341 обладает высокой технологичностью при литье и обработке давлением, помимо листов возможно изготовление широкой номенклатуры полуфабрикатов – например прессованных профилей. В данной работе приведены результаты исследований влияния температуры деформации на структуру и свойства массивных прессованных профилей из сплава В-1341 при изготовлении на промышленном оборудовании одного из ведущих металлургических предприятий России – ОАО «КУМЗ», которое уделяет большое внимание освоению производства полуфабрикатов из новых и перспективных алюминиевых сплавов [30].

Работа выполнена в рамках реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» по комплексной научной проблеме 10.10. «Энергоэффективные, ресурсосберегающие и аддитивные

технологии изготовления деформируемых полуфабрикатов и фасонных отливок из магниевых и алюминиевых сплавов» [31].

Материалы и методы

Исследования проведены на опытно-промышленных партиях прессованных профилей шифра НП10 из сплава В-1341 производства ОАО «КУМЗ» (рис. 1).

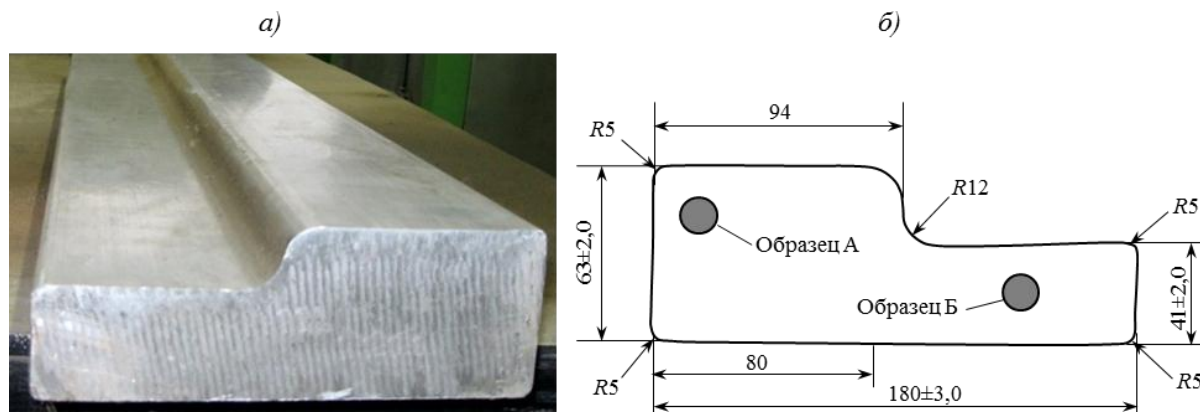


Рис. 1. Внешний вид прессованного профиля шифра НП10 из сплава В-1341 (а) и схема его сечения (б)

Прессование профилей проведено при двух температурах из цилиндрических слитков $\varnothing 360$ мм двух плавки (плавка №1 и №2), схожих по химическому составу, который удовлетворяет требованиям нормативной документации на сплав В-1341 (ОСТ1 90048 и ТУ).

Режимы изготовления профилей:

- режим 1.1 – плавка №1, температура нагрева заготовок под прессование 450–500°C, температура нагрева контейнера 400–450°C;
- режим 1.2 – плавка №1, температура нагрева заготовок под прессование 300–350°C, температура нагрева контейнера 300–350°C;
- режим 2.1 – плавка №2, температура нагрева заготовок под прессование 450–500°C, температура нагрева контейнера 400–450°C;
- режим 2.2 – плавка №2, температура нагрева заготовок под прессование 300–350°C, температура нагрева контейнера 300–350°C.

Прессование проводили прямым методом на горизонтально-гидравлическом прессе усилием 5000 тс из контейнера $\varnothing 370$ мм с использованием одноочковой матрицы с вытяжкой 9,4 со скоростью истечения металла 0,6–0,9 м/мин.

Исследования профилей плавки №1 проведены на 20 образцах для оценки разброса значений механических свойств при растяжении по сечению профиля (рис. 2); исследования профилей плавки №2 – на образцах, отобранных из двух зон по сечению (рис. 1): образец А – место отбора образцов по чертежу при оценке сдаточных характеристик, образец Б – дополнительный образец для оценки уровня прочностных свойств в «тонкой» части профиля.

Для оценки влияния температуры деформации на комплекс свойств от выходного и утяжинного концов профилей обеих плавки отобраны образцы для исследования структуры, механических (σ_b , $\sigma_{0,2}$, δ) и коррозионных свойств (МКК, РСК) в состоянии полной термической обработки Т1 (закалка, правка растяжением со степенью остаточной деформации 3,0–3,5%, искусственное старение) в цеховых условиях.

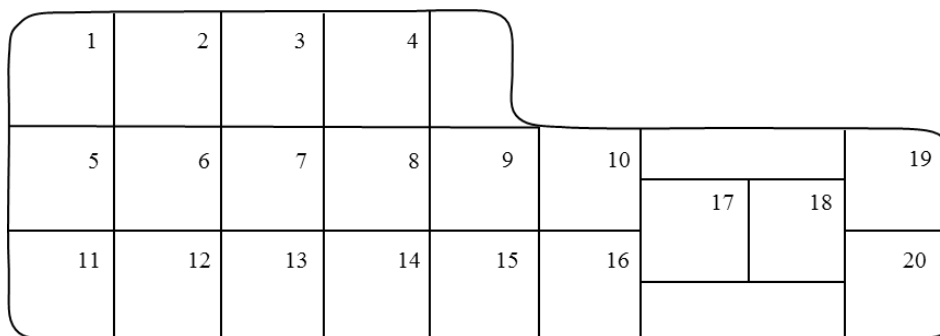


Рис. 2. Схема отбора образцов из пресованного профиля шифра НП10 из сплава В-1341 для испытания механических свойств при растяжении

Проведено также исследование механических свойств после термической обработки в лабораторных и цеховых условиях. Образцы отбирали из профилей плавки №1 с выходного конца.

Исследование структуры проведено в соответствии с МР21-31–85; механических свойств – по ГОСТ 1497; МКК – по ГОСТ 9.021 в рабочих емкостях при полном погружении образцов в раствор 1 в течение 24 ч при 30°C; РСК – по ГОСТ 9.904 в рабочих емкостях при полном погружении образцов в раствор 4 в течение 7 сут.

Результаты

В табл. 1 приведены результаты испытания механических свойств при растяжении профилей, термообработанных в лабораторных условиях (закалка и искусственное старение).

Таблица 1

**Механические свойства профилей из сплава В-1341
(закалка и искусственное старение в лаборатории)**

Режим изготовления	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1.1	345–380	315–365	12,0–16,0
1.2	315–330	290–305	14,0–18,0
Требования по ТУ	295	280	10,0

В табл. 2 приведены свойства профилей, закаленных и правленных в цеховых условиях, искусственное старение в лаборатории.

Таблица 2

**Механические свойства профилей из сплава В-1341
(цеховая закалка, искусственное старение в лаборатории)**

Режим изготовления	$\sigma_{в}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1.1	355*	345*	8,5*
	370–395	350–375	11,0–14,0
1.2	325–335	295–310	10,5–15,0
Требования по ТУ	295	280	10,0

* Образец №1 не удовлетворяет требованиям ТУ по значениям δ .

В табл. 3 приведены свойства пресованных профилей из сплава В-1341, термообработанных в цеховых условиях.

Таблица 3

**Механические свойства профилей из сплава В-1341
(термообработка в цехе)**

Режим изготовления	Место отбора образцов	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
1.1	Выход	340–375	330–365	10,5–13,0
	Утяжина	285*	280*	9,0*
		325–380	320–370	10,5–14,0
1.2	Выход	310–325	300–315	10,0–15,0
	Утяжина	320–325	305–315	11,0–15,0
2.1	Выход	375–380	355–370	10,5–11,0
	Утяжина	380–385	360–365	11,5–14,5
2.2	Выход	315–330	310–315	12,0–15,0
	Утяжина	315–320	305–310	13,0–13,5
Требования по ТУ	–	295	280	10,0

* Четыре образца (№1, 11, 19, 20) не удовлетворяют требованиям ТУ по значениям σ_b , из них два – по $\sigma_{0,2}$ и один – по δ .

На рис. 3–5 приведена макро- и микроструктура профилей после прессования при различных температурах.

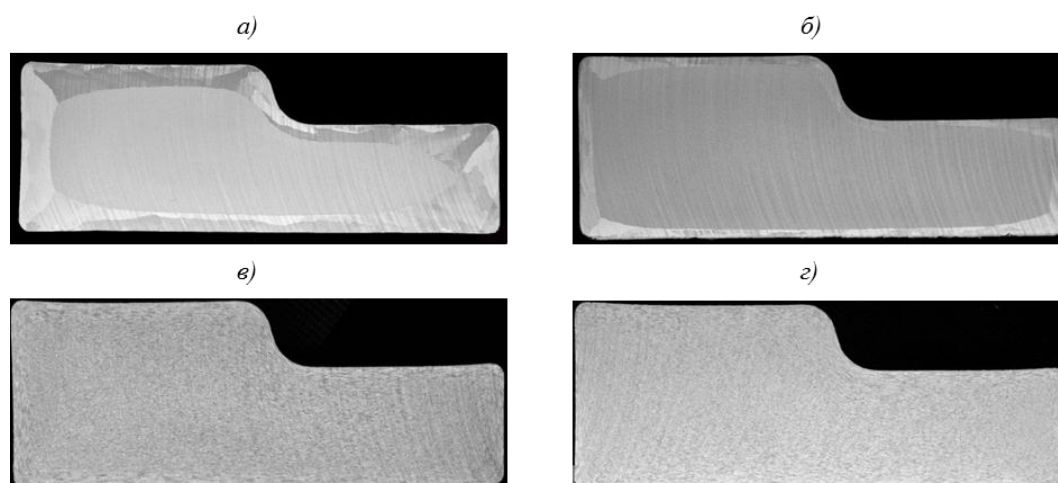


Рис. 3. Макроструктура профиля шифра НП10 из сплава В-1341 (плавка №1) после прессования при высокой (а, б) и низкой (в, з) температуре – утяжинный (а, в) и выходной (б, з) конец

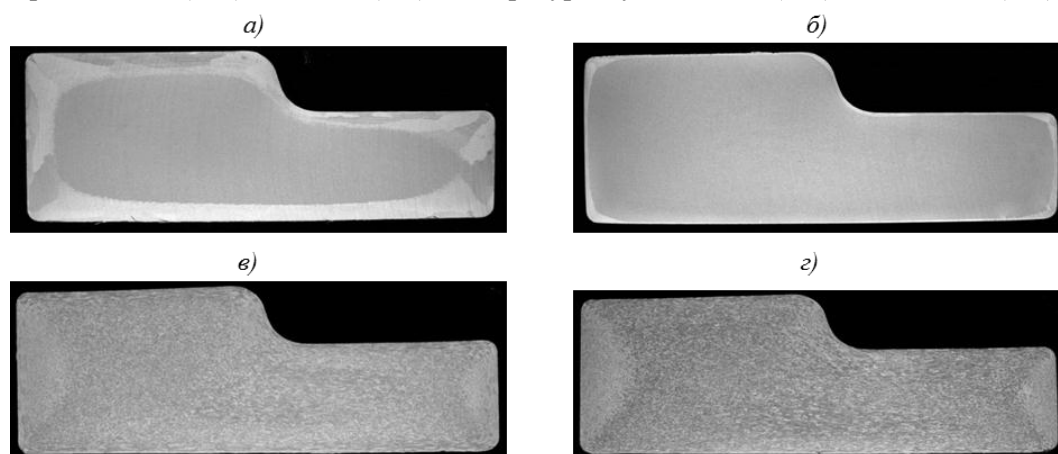


Рис. 4. Макроструктура профиля шифра НП10 из сплава В-1341 (плавка №2) после прессования при высокой (а, б) и низкой (в, з) температуре – утяжинный (а, в) и выходной (б, з) конец

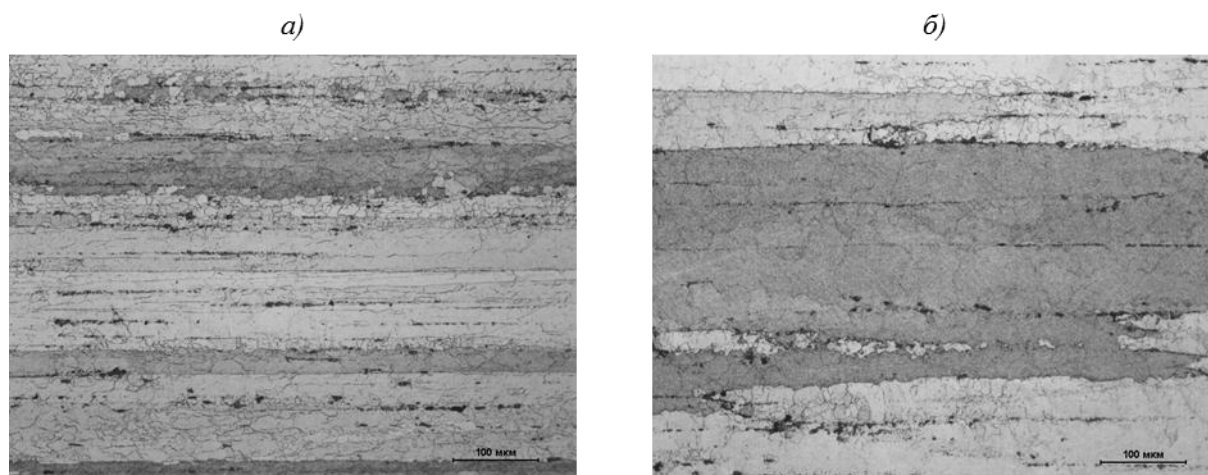


Рис. 5. Микроструктура периферийной и центральной зон профиля шифра НП10 из сплава В-1341-Т1 – выходной (а) и утяжинный (б) конец

Таблица 4

Коррозионные свойства профилей из сплава В-1341-Т1

Режим изготовления	Место отбора образцов	РСК, балл	МКК, мм
1.1	Выход	3	Отсутствует
	Утяжина		
1.2	Выход	3–4	0,09
	Утяжина		
2.1	Выход	2–3	0,07
	Утяжина		
2.2	Выход	3	0,11
	Утяжина		

В табл. 4 приведены результаты испытаний прессованных профилей на склонность к расслаивающей (РСК) и межкристаллитной (МКК) коррозии.

Обсуждение и заключения

Термическая обработка в лабораторных условиях образцов плавки №1 позволяет получить на профилях, изготовленных при низкой и высокой температуре, уровень прочностных характеристик, удовлетворяющий требованиям ТУ.

Уровень механических свойств прессованных профилей шифра НП10 из сплава В-1341, термообработанных в лаборатории (табл. 1) и закаленных в цехе (табл. 2), позволяет сделать вывод, что при исследованиях по подбору режимов термической обработки можно руководствоваться данными, полученными в лабораторных условиях. При этом стоит отметить и принимать во внимание тот факт, что после полной термообработки в лаборатории уровень значений предела прочности и условного предела текучести несколько ниже, чем после закалки и правки в цеховых условиях и искусственного старения в лаборатории. Это объясняется отсутствием операции правки растяжением между закалкой и искусственным старением при проведении термической обработки в лаборатории.

После проведения в цехе полной термической обработки всех партий профилей уровень прочностных характеристик удовлетворяет требованиям ТУ (табл. 3). При прессовании при высокой температуре (450–500°C) свойства профилей выше, чем при низкой (400–350°C). Однако в профилях партии 1.1 существует разброс значений меха-

нических свойств по сечению – на четырех образцах (№1, 11, 19, 20), расположенных в «углах» профиля в зоне максимального трения между заготовкой и оснасткой при прессовании, наблюдается отклонение по значениям свойств (ниже уровня по ТУ). Аналогичная картина, но в меньшем объеме (отклонение по значению относительного удлинения) выявлена при проведении искусственного старения образцов в лабораторных условиях (табл. 2).

В макроструктуре профилей, отпрессованных при высокой температуре, обеих плавок можно наблюдать крупнокристаллический ободок как с выходного так и с утяжинного концов (рис. 3, а, б и рис. 4, а, б), который может являться одной из причин отклонений по уровню значений механических свойств на партии 1.1. Макроструктура профилей, отпрессованных при низкой температуре, с обоих концов однородная мелкозернистая по всему сечению, дефектов в виде плен, неметаллических включений и пористости не обнаружено (рис. 3, в, г и рис. 4, в, г).

Микроструктура профилей всех исследуемых партий представляет собой тонкую волокнистую субзернистую структуру на периферии и более крупнозернистую в центре (рис. 5).

Таким образом, можно сделать вывод, что прессование при низкой температуре (300–350°C) позволяет получить на профилях из сплава В-1341 мелкозернистую равноосную структуру и стабильный по длине профиля уровень прочностных характеристик, удовлетворяющий требованиям ТУ. Прессование при высокой температуре (450–500°C) также позволяет получить профили с уровнем механических свойств выше, чем при низкой температуре, однако возможны отклонения по значениям механических свойств. На периферии по сечению появляются довольно большие зоны с крупнокристаллической структурой, которая может привести к снижению ресурсных характеристик и коррозионной стойкости при эксплуатации в конструкции. Результаты исследования склонности к МКК и РСК это подтверждают (табл. 4).

Экономический эффект прессования при более низкой температуре очевиден – снижение времени и энергозатрат на нагрев заготовок и оснастки перед прессованием и, как следствие, увеличение производительности оборудования, снижение расхода электроэнергии и стоимости единицы продукции.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарность специалистам ОАО «КУМЗ» И.П. Бурляевой, Б.В. Овсянникову и Е.Г. Булгаковой, которые внесли неоценимый вклад в проведенную работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридляндер И.Н. Воспоминания о создании авиакосмической и атомной техники из алюминиевых сплавов. М.: Наука, 2005. 277 с.
2. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ткаченко Е.А., Вахромов Р.О. Алюминиевые деформируемые сплавы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 167–182.
3. Каблов Е.Н. Материалы для изделия «Буран» – инновационные решения формирования шестого технологического уклада // Авиационные материалы и технологии. 2013. №S1. С. 3–9.
4. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2007. №5. С. 7–27.
5. Доспехи для «Бурана». Материалы и технологии ВИАМ для МКС «Энергия–Буран» / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: Наука и жизнь, 2013. С. 12.
6. Махсидов В.В., Колобнев Н.И., Каримова С.А., Сбитнева С.В. Взаимосвязь структуры и коррозионной стойкости в сплаве 1370 системы Al–Mg–Si–Cu–Zn // Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 8–13.

7. Hirsch J. Virtual fabrication of aluminium products. Microstructural modeling in Industrial Aluminium Production. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim, 2006.
8. Колобнев Н.И., Бер Л.Б., Хохлатова Л.Б., Рябов Д.К. Структура, свойства и применение сплавов системы Al–Mg–Si–(Cu) // *МиТОМ*. 2011. №9. С. 40–45.
9. Očenášek V., Sedláček P. The effect of surface recrystallized layers on properties of extrusions and forgings from high strength aluminium alloys // 20-th International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, 2011. P. 853–860.
10. Byrol Y. The effect of processing and Mn content on the T5 and T6 properties of AA6082 Profiles // *Journal of Material Processing Technology*. 2006. No. 173. P. 84–91.
11. Арчакова З.Н., Балахонцев Г.А. и др. *Алюминиевые сплавы. Структура и свойства полуфабрикатов из алюминиевых сплавов: справочник*. М.: *Металлургия*, 1974. 432 с.
12. Sweet E.D., Caraher S.K., Danilova N.V., Zhang X. Effect of Extrusion Parameters on Coarse Grain Surface Layer in 6xxx-Series Extrusions // *Proceedings of the 8th International Aluminum Extrusion Technology Seminar*. V. 1. Orlando, 2004. P. 115–126.
13. Sherstnev P., Zamani A. Modeling of static and geometric dynamic recrystallization during hot extrusion of Al–Mg–Si alloy // *Materials Science Forum*. 2014. V. 794–796. P. 728–733.
14. Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Колобнев Н.И., Ткаченко Е.А. И.Н. Фридляндер и его сплавы // *Цветные металлы*. 2013. №9. С. 28–29.
15. *История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова*. М.: ВИАМ, 2012. С. 152.
16. Грушко О.Е., Овчинников В.В., Алексеев В.В., Гуреева М.А., Шамрай В.Ф., Клочков Г.Г. Структура, способность к выдавке и свариваемость листов из сплавов системы Al–Mg–Si // *МиТОМ*. 2007. №7 (625). С. 15–22.
17. Ovsyannikov V.V., Grushko O.E., Klochkov G.G., Varchenya P.A., Bulgakova E.G., Popov V.I. Industrial development of hi-tech alloy B-1341 of Al–Mg–Si system alloyed by calcium // *Proceedings of the 11 ICAA*. 2008. V. 1. P. 222–228.
18. Klochkov G.G., Grushko O.E., Ovchinnikov V.V., Shamray V.F., Girsh R.I. The structure, formability and weldability of B-1341 Al–Mg–Si alloy sheets // *Ibid*. P. 241–247.
19. Клочков Г.Г., Грушко О.Е., Попов В.И., Овчинников В.В., Шамрай В.Ф. Структура, технологические свойства и свариваемость листов из сплава B-1341 системы Al–Mg–Si // *Авиационные материалы и технологии*. 2011. №1. С. 3–8.
20. Курдюмов А.В., Инкин С.В., Чулков В.С., Шадрин Г.Г. *Металлические примеси в алюминиевых сплавах*. М.: *Металлургия*, 1988. 143 с.
21. Грушко О.Е., Иванова Л.А., Инкин С.В. и др. Влияние примесных элементов на технологическую пластичность алюминиево-литиевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 1992. №1. С. 53–56.
22. Грушко О.Е., Шевелёва Л.М. Примеси щелочных и щелочно-земельных металлов в алюминиево-литиевом сплаве 1420 // *Цветные металлы*. 1994. №4. С. 48–52.
23. Hyung-Won Park, In-Sang Jeong, Yeong-Hwa Kim, Su-Gun Lim. Effect of Ca addition on microstructure of semi-solid Al–Zn–Mg al alloys during reheating // *Proceedings of the 12 ICAA*. 2010. P. 1726–1729.
24. Trond Furu, Nadia Telioui, Carl Behrens, Jochen Hasenclever, Paul Schaffer. Trace elements in aluminium alloys: their origin and impact on processability and product properties // *Ibid*. P. 282–289.
25. Дриц А.М., Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Тарытина И.Е. Исследование влияния дополнительного легирования на окисляемость при нагреве сплавов алюминия с магнием // *Цветные металлы*. 2011. №6. С. 67–71.
26. Стригавкова Е., Вайс В., Михна С. Исследование структуры и жидкотекучести сплава системы Al–Si–Mg с различным содержанием кальция // *Металлург*. 2012. №9. С. 84–88.
27. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Тарытина И.Е. Свойства магниевых сплавов, легированных кальцием // *Металлургия машиностроения*. 2008. №2. С. 31–35.
28. Рохлин Л.Л. и др. Магниевые сплавы, легированные кальцием // *МиТОМ*. 2009. №4. С. 14–19.

-
29. Белов В.Д., Колтыгин А.В., Белов Н.А., Плисецкая И.В. Инновации в области литейных магниевых сплавов // *Металлург*. 2010. №5. С. 67–70.
 30. Скорняков В.И., Антипов В.В., Семовских С.В. Развитие металлургического производства Каменск-Уральского металлургического завода для полуфабрикатов из новых алюминиевых сплавов // *Цветные металлы*. 2013. №9. С. 30–33.
 31. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-33.
 28. Rokhlin L.L. i dr. Magnievye splavy, legirovannye kalciem [The magnesium alloys alloyed by calcium] // *MiTOM*. 2009. №4. S. 14–19.
 29. Belov V.D., Koltygin A.V., Belov N.A., Pliseckaya I.V. Innovacii v oblasti litejnykh magnievnykh spлавov [Innovations in the field of cast magnesium alloys] // *Metallurg*. 2010. №5. S. 67–70.
 30. Skornyakov V.I., Antipov V.V., Semovskikh S.V. Razvitie metallurgicheskogo proizvodstva Kamensk-Uralskogo metallurgicheskogo zavoda dlya polufabrikatov iz novykh alyuminievnykh spлавov [Development of metallurgical production of Kamensk-Uralsky Metallurgical Works for semi-finished products from new aluminum alloys] // *Tsvetnye metally*. 2013. №9. S. 30–33.
 31. Kablov E.N. Innovacionnye razrabotki FGUP «VIAM» GNC RF po realizacii «Strategicheskikh napravlenij razvitiya materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda» [Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030»] // *Aviacionnye materialy i tehnologii*. 2015. №1 (34). S. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.