

О ПРИРОДЕ ХРУПКОГО РАЗРУШЕНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВА АМг6

Головкин П.А., к.т.н.

АО «Плутон», 105120, Россия, г. Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, д.11.

p.golovkin@pluton.msk.ru; тел.: (495) 730-36-19

ON THE NATURE OF BRITTLE FRACTURE OF BILLETS Al-6%Mg ALLOY

P. A. Golovkin, Ph.D. in Engineering Science

Pluton JSC, 11, Nijnyaya Syromyatnicheskaya, 105120, Moscow, Russian Federation.

Phone: +7 (495) 730-36-19, p.golovkin@pluton.msk.ru

Аннотация

Рассматриваются причины встречающейся повышенной склонности к хрупкому разрушению при нормальных температурах материала прутков из алюминий-магниевого сплава АМг6, аналога сплавов А95546 и А95556 в США. Показано, что причина указанного явления кроется в повышенном количественном содержании в материале интерметаллидных фаз, обозначаемом в виде показателя КСИФ. Рассматривается природа повышенного значения этого показателя.

Abstract

The reasons for the increased tendency to brittle fracture encountered at normal temperatures in aluminium-magnesium alloy АМг6 bars are discussed of Al-6%Mg alloy (abbreviation of the Russian alphabet "АМг6") alloy, analog of alloys А95546 and А95556 in the USA. It is shown, that the cause of the above phenomenon lies in the increased quantitative content of intermetallic phases in the material, designated as an index of QISIF. The nature of the increased value of this index is considered.

Ключевые слова: алюминий-магний сплав, химический состав, интерметаллидные фазы, примеси, количественное содержание интерметаллидных фаз (КСИФ), показатели горячей деформации, границы зёрен, металлические связи.

Key words: aluminium alloy, chemical composition, intermetallic phases, impurities, quantitative content of intermetallic phases (QCOIP), hot deformation parameters, grain boundaries, metal bonds.

Общие положения

Особенностью алюминиевых сплавов группы АМг, химический состав которых определяется ГОСТ 4784 [1], является образование в неравновесных условиях кристаллизации и деформационных процессов различных интерметаллидных фаз, в первую очередь Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 с температурами плавления 450 и 452 °С [2, 3].

Уже при температурах расплава, на 10...20 °С превышающих температуру ликвидуса, диаграмма состояния сплавов системы Al-Mg, описывается как «сложная, с интерметаллическими соединениями переменного состава, эвтектиками и ограниченными твёрдыми растворами на основе Al и Mg» [4], где группировки атомов твёрдого раствора составляют около 700 атомов при радиусе областей упорядочения около 1,6 нм [4]. Переходящие из расплава интерметаллиды дополняются теми, что возникают при проковке слитка и дальнейшей деформационной проработке металлического материала, и их количественное содержание возрастает.

Важно, что при этом формально не меняется химический состав материала, и при проведении предписанными, например, ГОСТ 21488 [5] на прутки из алюминиевых сплавов, проверок химическим или спектральным методами, количественное содержание интерметаллидных фаз не определяется. То же касается и таких современных методов, как атомно-эмиссионной спектроскопии с индукционно связанной плазмой (АЭС-ИСП) [6] и индукционно связанной плазмы с тлеющим разрядом и масс-спектроскопии (ИСП-МС) [7], не отделяющих фазы Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 от основного твёрдого раствора. В то же время, образующиеся в ходе взаимодействия алюминия и магния с примесями соединения $AlFeSi$, $AlFeSiMn$, Fe_2SiAl_8 , $CuMg_4Al_6$, $(FeMn)Al_6$ и другие [2, 3] легко определяются как стандартными [5] методами, так и методами АЭС-ИСП и ИСП-МС и однозначно классифицируются как примеси, предельное содержание которых прописано в ГОСТ 4784.

Изложенное свидетельствует о том, что образующиеся непосредственно из основных компонентов сплава соединения Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 занимают особенное место в ряду образующих металлический материал химических элементов и их соединений. Исходя из этого, далее содержание интерметаллических соединений в материале будет описываться как количественное содержание интерметаллидных фаз – КСИФ, и для упрощения, сводиться к двум остающимся – Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 .

Поскольку соединения Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 плавятся конгруэнтно, не распадаясь на составляющие, очистка от них твёрдого раствора представляет определённую сложность [2, 3]. А именно: так как фаза Mg_2Al_3 , и в особенности, Mg_5Al_8 , являются искажёнными и метастабильными [2, 3], они склонны к разрушению и диффузионному переходу в состав твёрдого раствора при длительном отжиге в промежутке температур 430...440 °С [8]. Однако ОСТ 92-1019 [9] для сплавов АМг5 и АМг6 предусматривает высокий отжиг при температурах 310...335 °С в течение не более 3 часов, либо при температуре до 500...520 °С, с соответствующим сокращением выдержки.

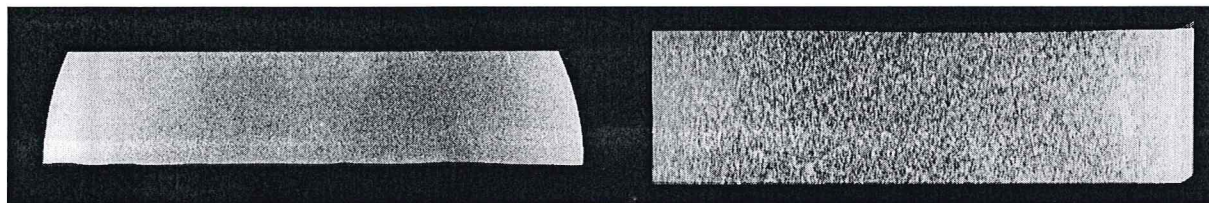


Рисунок 1. Макроструктура прессованного прутка из сплава АМг6 в поперечном (слева) и продольном (справа) направлении

Также, для повышения пластичности катаных и прессованных материалов из сплавов АМГ5 и АМг6, ОСТ 92-1019 разрешает проводить предварительный отжиг при температурах 380...440 °С, с обязательным последующим высоким отжигом по приведённому режиму. Это входит в противоречие с выше указанным условием растворения фаз, требующего большего времени [8], а кроме того, естественным образом снижает в материале достигнутое при горячей деформации упрочнение. В то же время, отжиг сплава системы Al-Mg при 227...252 °С приводит к сфероидизации интерметаллидных фаз в обеднённом магнием материале, но не к их растворению.

Это значит, что, растворение в металлическом материале образовавшихся соединений Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 при условии сохранения его заданных структуры и свойств представляет собой технологически противоречивую задачу, и что лучше было бы изначально избыточного их количественного содержания не допускать.

Направленное расположение интерметаллидных фаз определяет вид макро- и микроструктуры материала стандартных [5] прессованных прутков. Макрошлифы прессованного прутка Ø 60 мм из сплава АМг6 с присущей строчечной структурой материала представлены на рисунке 1.

Повышенное значение КСИФ может влиять на характер разрушения деталей и полуфабрикатов под нагрузкой. На рисунке 2 представлен пример хрупкого разрушения прутка Ø 60 мм при его использовании в качестве подпора для поджатия крупной заготовки (ковочного штампа) задней бабкой токарного станка. Разрушению заготовки могло способствовать строчечное расположение интерметаллидных фаз, и то, что материал находился в неотожжённом состоянии [5], поскольку поступающие в цех заготовки предназначались для дальнейшейковки или штамповки. Следует отметить, что все поступающие прутки проходили прочностные испытания на разрывных образцах, что было бы невозможно при загрязнении материала, например, примесями нерастворимого в алюминии натрия.

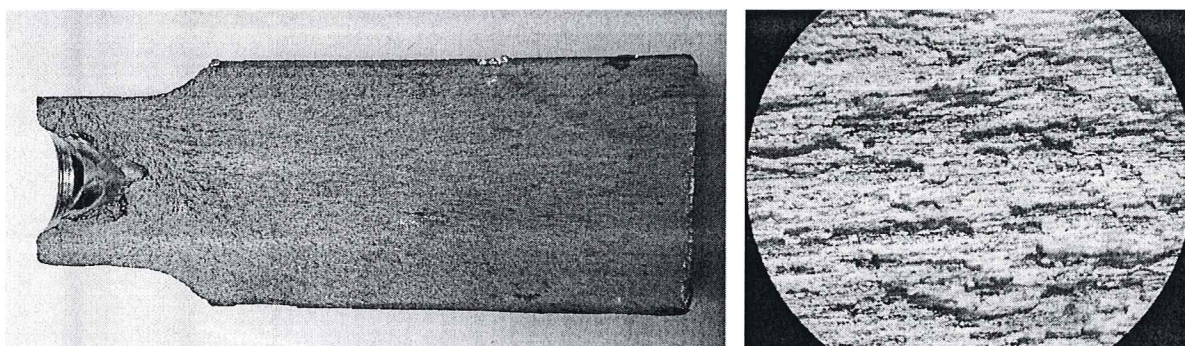


Рисунок 2. Разрушение прутка из сплава АМг6 и поверхность излома, 16^х.

Влияние технологических факторов на КСИФ материала

Горячая пластическая деформация складывается из суммы её механизмов, которые условно можно разделить на внутризёрный и межзёрный [10]. Последний преобладает там, где самолокализация энергетически выгодных сдвиговых деформаций и деформационный разогрев, определяют повышение КСИФ в материале [11].

Температура и деформация напрямую влияют на образование интерметаллических соединений, и потому КСИФ является, в том числе, функцией этих показателей. Стандартным методом сечений [12] были определены значения КСИФ для прутков, исследованных в 2000 и 2015 году, последний из которых и показал хрупкое разрушение. Результаты замеров КСИФ и значений микротвёрдости материала прутков в продольном и поперечном направлениях, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

КСИФ, % масс. в материале прутков из сплава АМг6 разных лет изготовления

Материал	Год выпуска	Направление	Твёрдость, МПа	КСИФ, % масс.
АМг6, пруток	2000	продольное	100...120	1,6...1,8
	2000	поперечное	105...143	
	2015	продольное	115...130	4,3...4,6
	2015	поперечное	125...150	

Для прутка производства 2000 года твёрдость материала в продольном и поперечном направлении составила 105...143 МПа и 100...120 МПа, то есть отличалась на 26 и 20 % от наименьшего значения, для прутка 2015 года эти значения составили 125...150 МПа и 115...130 МПа, то есть 16 и 12 %. Такое повышение твёрдости может быть следствием упрочнения примесями более загрязнённого металлического

материала [13, 14]. При этом твёрдость больше у краёв прутка, где при прессовании трущаяся о поверхность матрицы часть материала упрочняется сильнее, чем в центре, где скорость его истечения выше, и оттого преобладают напряжения растяжения [15].

Типичные структуры материала прутков 2000 и 2015 годов изготовления показаны на рисунке 3. Они сильно отличаются, и причина этого частично состоит в том, что КСИФ этих материалов различается примерно в 3 раза. В то же время следует отметить, что проверка стойкости материала, например, к развитию межкристаллитной коррозии, в соответствии с ГОСТ 21488, не обязательна для прутков из сплава АМгб [5], а потому действительные состояние и свойства поступающего в производство материала могут оставаться неизвестными [16]. Рисунок 3 также показывает, что при одинаковом травлении шлифа, структура материала прутка 2015 года относительно такого 2000 года, отличается выраженной фактурностью и более высоким КСИФ, поскольку травление изменяет поверхности тем сильнее, чем более загрязнённым примесями является материал [13, 14, 17], и чем сильнее электродный потенциал этих примесей отличается от фонового потенциала материала [18].

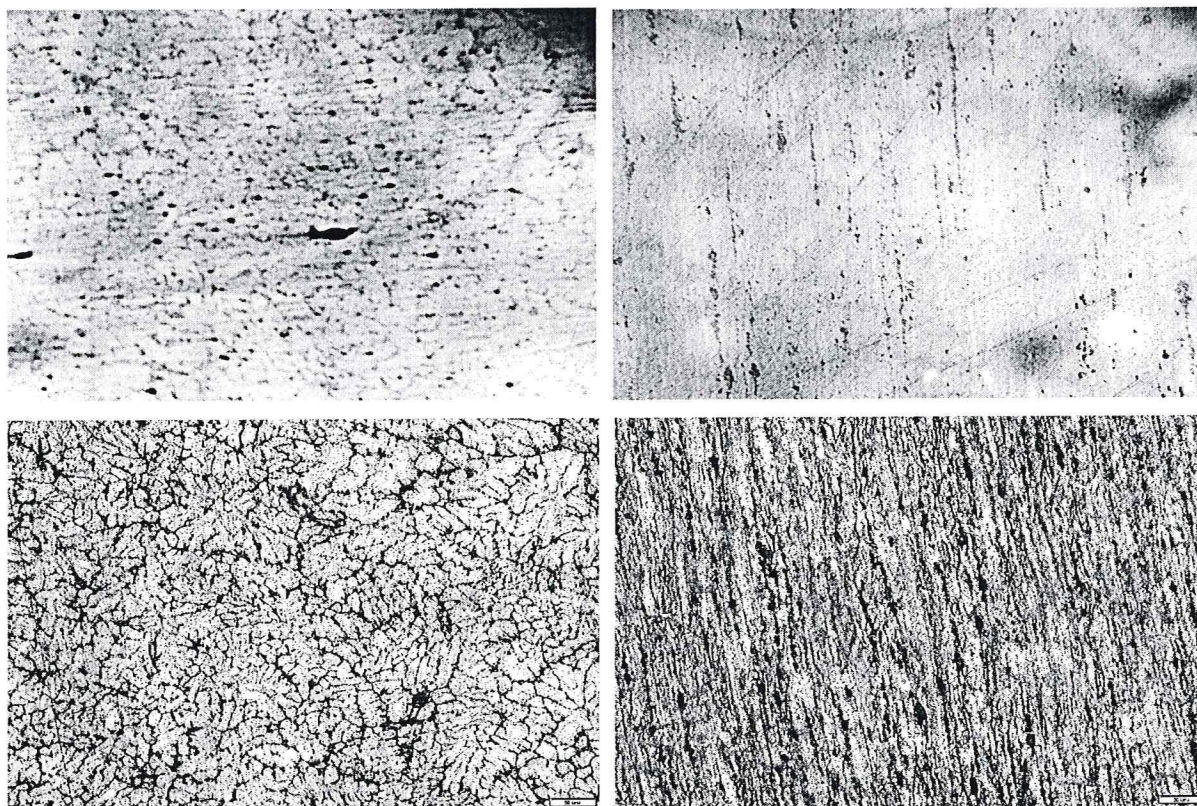


Рисунок 3. Микроструктура прутка в поперечном (слева) и продольном (справа) направлении, 200 \times . Материал 2000 (вверху) и 2015 (внизу) года.

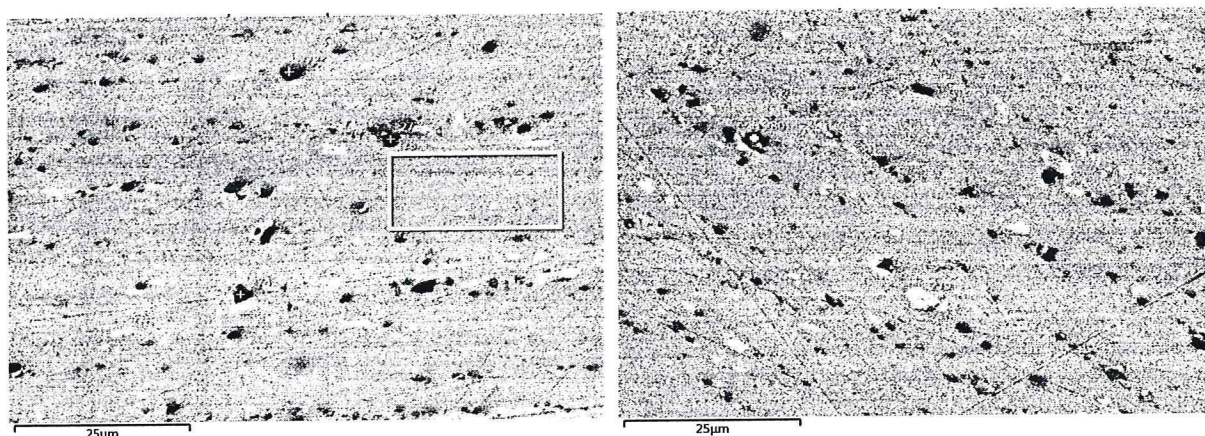


Рисунок 4. Типичная структура поковки из материала 2015 года, 400[×].

Что касается замеренного КСИФ, то укрупнённо, его можно разделить на три неравные части. Из приведённых в таблице 1 значений от чуть менее половины до примерно $2/3$ составляет пластичная эвтектика Mg_2Al_3 , от примерно $1/4$ до $1/3$ – твёрдые включения Mg_5Al_8 , и оставшуюся часть представлено соединениями на основе железа и углерода, а также марганца, кремния и хрома.

Полученные стандартным планометрическим методом [12] значения сильно зависят от места фотографирования структуры материала в образце, различаясь даже в рядом расположенных участках, примеры структур которых для материала штампованной поковки изготовления 2015 года приведены на полученных с использованием электронного микроскопа фотографиях рисунка 4. Видно, что цепочки включений и микронесплошностей занимают существенную часть поля шлифа.

Дополнительную информацию можно почерпнуть из полученных рентгенофлуоресцентным методом масс-спектрометрии высокого разрешения [19] распределений примесей на контрольном участке металлографического шлифа, позволяющих в некоторой степени оценить их взаимное влияние. На рисунке 5 показаны типичный участок шлифа (5а), и – распределение на нём основных и примесных химических элементов – алюминия (5б), магния (5в) и железа (5г). Здесь более светлые участки соответствуют большому содержанию элемента, и наоборот. Видно, что в местах расположения соединений Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 количественное содержание алюминия понижается, а магния – повышается в соответствии с их соотношением в указанных химических формулах. Кроме того, применение метода [19] показало наличие в материале большого количества примесей на основе железа и углерода, привнесённых, предположительно, материалом тиглей.

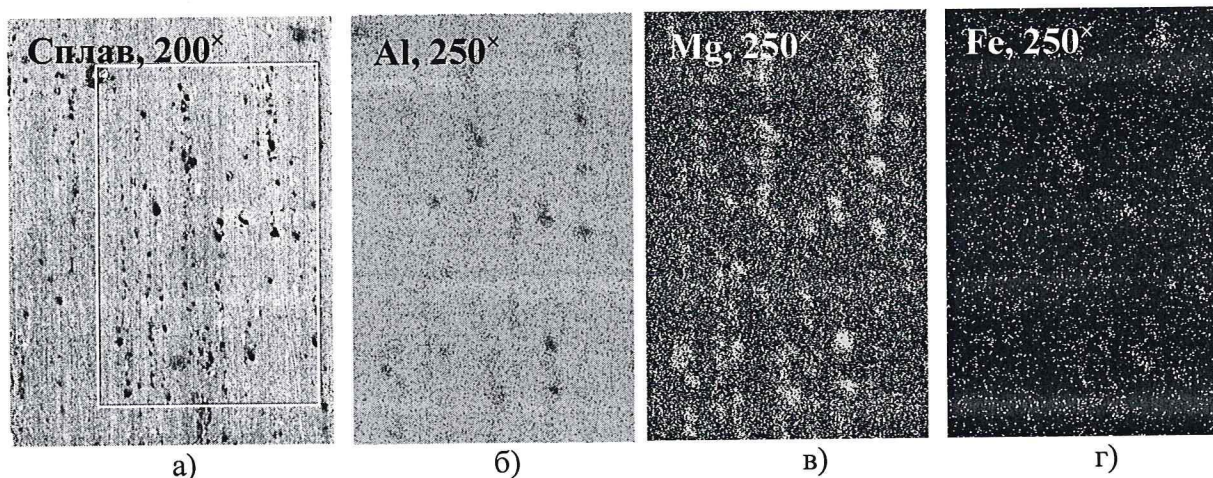


Рисунок 5. Распределение Al, Mg и Fe в материале поковки 2015 года.

То, что на фотографии 5г примеси железа хорошо различимы не смотря на их небольшое количественное содержание, дополнительно указывает на необходимость проведения контроля содержания химически гораздо менее отличных от основного состава твёрдого раствора соединений Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 .

Приведённые в таблице 1 значения КСИФ в материале образцов отражают тот факт, что в материале 2015 года большая часть входящего в исходный слиток магния перешла в соединения Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 , отчего его местное содержание в расположенных рядом с интерметаллидами материале твёрдого раствора быть снижено на несколько массовых процентов относительно указанных в ГОСТ 4784 требований.

Такое точечное отклонение химического состава материала может сказаться на его свойствах, в частности, коррозионной стойкости, вследствие образования местных напряжений и разности электродных потенциалов вновь образовавшихся и привнесённых фаз и основной матрицы [18]. Кроме того, известно [8], что каждый процент массового содержания магния в сплавах системы Al-Mg повышает предел прочности материала в среднем на 30...40 Мпа, и наоборот.

Изучение связи КСИФ с параметрами деформационных процессов, на основе выявленных зависимостей [10, 11] позволяет предположить, что основной причиной существенного различия его значения в материале произведённых в разные годы прутков, могло стать стремление производителя снизить издержки производства. Для этого могли быть увеличены температура прессования прутка, следствием чего наряду со снижением усилия прессования, стал больший разогрев материала на выходе из матрицы, и большее КСИФ.

Роль величины температуры деформации в сопротивляемости разрушению алюминиево-магниевых сплавов иллюстрирует ГОСТ 92-1619 [20], предписывающий в случае разрушения поковок из сплава АМгб при установленных этим же документом температурах деформации (430...300 °С) снижать её до не более чем 350 °С. При этом важен характер разрушения, когда образующиеся трещины в их тонкой части заполняются жидкостью на базе эвтектики Mg_2Al_3 с вкраплениями частиц Mg_5Al_8 , как это описано в работе [21].

Другой причиной повышенного содержания интерметаллидных фаз в материале прессованного прутка могло стать отступление от необходимой продолжительности отжига исходного слитка, когда при 430...440 °С происходит диффузионное растворение соединений Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 кристаллизационного происхождения и снижение внутрикристаллитной ликвации магния по сечению дендритных ячеек [8].

Это значит, что проведение необходимого отжига слитка, и далее, обеспечение меньшей действительной температуры металлического материала при прессовании исходного прутка, равно как и недопущение его перегрева при последующей ковке и штамповке полученных из прутков заготовок, ограничит резкое повышение в материале КСИФ и его обеднение магнием. Таким образом может быть сохранена необходимая стабильность химического состава металлического материала и его соответствие тем задачам, для которых он когда-то создавался. В противном же случае, как это иногда имеет место, сильная микрохимическая неоднородность металлического материала может отрицательно сказаться на его свойствах.

Выводы

1. Насыщенный интерметаллидами металлический материал, в особенности при их строчечном расположении, склонен к хрупкому разрушению. Поскольку многие современные методы анализа химического состава не различают материал, находящийся в составе твёрдого раствора от материала, связанного в интерметаллические соединения, он может соответствовать заявленному химическому составу, не обеспечивая некоторых заданных свойств.

2. Стандартные проверки качества прутков из сплава АМгб не дают безусловного подтверждения их соответствия заявленным свойствам. Определение в материале КСИФ при его металлографическом анализе может дать дополнительную информацию о возможных отклонениях свойств проверяемого материала от заданных.

3. КСИФ в материале прутков из алюминий-магниевого сплава является функцией от температуры и показателей деформации при их получении. Поэтому недопущение перегрева металлического материала при его прессовании, равно как и в процессе дальнейшего получения из него поковок и штамповок позволит избежать резкого обеднения материала магнием при его переходе в связанные с алюминием интерметаллические соединения.

Список источников

1. ГОСТ 4784-2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки / –М.: Стандартинформ, 2019. -31 с.
2. А.И. Беляев О.С. Бочвар, Н.Н. Буйнов, др. / Металловедение алюминия и его сплавов / Справ. под ред. И.Н. Фридляндера / –М.: Металлургия, 1983. -280 с.
3. Л.Ф. Мондольфо / Структура и свойства алюминиевых сплавов / пер. с англ. / –М.: Металлургия, 1979. -640 с.
4. А.И. Беляев, О.С. Бочвар, Н.Н. Буйнов, др. / Металловедение алюминия и его сплавов: Справ. изд. 2-е изд., перераб. и доп. / – М.: Металлургия, 1983. -280 с.
5. ГОСТ 21488-97 Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия / –М.: Издательство стандартов, 2001. -29 с.
6. А.А. Пупышев, Д.А. Данилова / Использование атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой для анализа материалов и продуктов чёрной металлургии / –Екатеринбург: Аналитика и контроль, 2007, Т.11. № 2-3, с. 131...181.
7. А.В. Алексеев, П.В. Якимович / Применение метода масс-спектрометрии высокого разрешения с тлеющим разрядом в анализе никелевых сплавов / –М.: Труды ВИАМ, 8 (90), 2020, с. 101...108.
8. О.Е. Осинцев, С.Л. Никитин / Высокопрочные коррозионностойкие литейные алюминиевые сплавы системы Al-Mg с повышенным содержанием кремния / – М.: МАТИ, 2008. -264 с.
9. ОСТ 92-1019-81 / Детали из алюминиевых и магниевых сплавов. Технические требования / –М.: ВИАМ, ОНТИ, 1981. -67 с.
10. Галкин В.И., Головкин П.А. / О влиянии механизмов деформации на структуру и свойства металлического материала / –М.: Упрочняющие технологии и покрытия, № 5, 2021, с. 207...214.

11. П.А. Головкин / Управление деформированной структурой алюминиево-магниевого сплава / –М.: Технология металлов, 2005, № 11. с. 10...16.
12. ГОСТ 21073.4-75 / Металлы цветные. Определение величины зерна планометрическим методом / –М.: Издательство стандартов, 2002. -24 с., с 20...24.
13. Окисление металлов. Том 1. Теоретические основы. Под ред. Ж. Бенара. / перевод с франц. / –М.: Металлургия, 1967, 499 с.
14. Окисление металлов. Том 2. Теоретические основы. Под ред. Ж. Бенара. / перевод с франц. / –М.: Металлургия, 1969, 444 с.
15. В.Р. Каргин, А.Ф. Гречникова, Я.А. Ерисов, Ю.С. Старостин / Теория и технология прессования алюминиевых сплавов: учебное пособие / –Самара.: Издательство ФГБОУВО «СГАУ», 2015. -80 с.
16. Головкин П.А. / О противоречии в отраслевых стандартах на горячую деформацию и контроль на пережог поковок из алюминиевых сплавов / –М.: Технология лёгких сплавов, № 1, 2023, с. 90...96.
17. В.И. Добаткин, Р.М. Габидуллин, Б.А. Колачев, Г.С. Макаров / Газы и окислы в алюминиевых деформируемых сплавах / –М.: Металлургия, 1976, 264 с.
18. В.С. Синявский, В.В. Истомин, В.В. Уланова / Исследование термомеханической обработки сплавов системы Al-Mg с целью повышения их коррозионной стойкости / Коррозионностойкие конструкционные сплавы / Тр. ВИАМ, вып. 7 / –М.: ОНТИ, 1975, 208 с.; с. 93...103.
19. А.В. Абрамов / Рентгенофлуоресцентный анализ: учеб.-метод. пособие / А.В. Абрамов, А.А. Пупышев / под общ. ред. канд. хим. наук, доц. А. В. Абрамова / – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. -96 с.
20. ОСТ 92-1619-87 / Заготовки штампованные из алюминиевых сплавов. Типовой технологический процесс горячей объёмной штамповки / –М.: ВИАМ, ОНТИ, 1985. -44 с.
21. Головкин П.А. / О факторе количественного содержания интерметаллидных фаз в природе разрушения поковок из сплава АМг6 / –М.: Технология лёгких сплавов, 2022, № 2, с. 15...19.