

УДК 691.771; 621.73; 621.7-4

Количество избыточных фаз как один из критериев качества сплавов системы Al–Mg

П.А. Головкин

ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва»

Quantity of excess phases as one of the quality criteria for alloys of the Al–Mg system

P.A. Golovkin

Public Joint Stock Company "Rocket and Space Corporation "Energia" named by S.P. Korolev"

На примере прутков, горячекатаных листов и поковок исследовано влияние горячей деформации на структуру и свойства материалов из сплавов группы АМг системы Al–Mg. Рассмотрены зависимости количества образующихся в ходе деформации и переходящих из материала слитка избыточных фаз от температуры и преобладающих механизмов горячей пластической деформации сплавов группы АМг. Показана связь количества избыточных фаз с коррозионной стойкостью, трещиностойкостью и герметичностью металлического материала. На основании сопоставления различных показателей горячей деформации и металлографии материала количественное содержание избыточных фаз обосновывается в качестве одного из комплексных показателей его качества. Предложены простые способы его достижения.

EDN: EELNCH, <https://elibrary/eelnch>

Ключевые слова: механизмы деформации, избыточные фазы, интерметаллиды, вакуумная плотность, разрушение материала, критерий качества сплава

On the example of bars, hot-rolled plates and forgings, the effect of hot deformation on the structure and properties of materials from alloys of the "AMg" group of the Al–Mg system is considered. Dependence of excess phases formed during deformation and transferred from ingot material with temperature and prevailing mechanisms of hot plastic deformation of alloys of "AMg" group is considered. The relationship of the amount of excess phases with the corrosion resistance of the metal material, its crack resistance and tightness is shown. Based on the comparison of various calculated indicators of hot plastic deformation and metallography of metal material, the quantitative content of excess phases is justified as one of the complex indicators of its quality, simple ways to achieve it are proposed.

EDN: EELNCH, <https://elibrary/eelnch>

Keywords: deformation mechanisms, excess phases, intermetallides, vacuum density, material fracture, alloy quality criteria

Общие положения и методика исследований. Особенности алюминиевых сплавов типа АМг [1] являются образование интерметаллических фаз [2] в областях локализованных деформаций [3] и склонность к развитию межкристаллитной и расслаивающей коррозии материала заготовок [4].

Примеси Fe, Si, Cr и Cu образуют с твердым раствором интерметаллиды Mg_2Si , $AlFeSi$, $AlFeSiMn$, Fe_2SiAl_8 , $CuMg_4Al_6$, $(CrFe)_4Si_4Al_{13}$, $(FeMn)Al_6$ и др. [5, 6]. Объемную долю часто описываемых не совпадающими формулами [2, 7] избыточных фаз по аналогии с работой К.С. Чернявского [8], обозначим как V_v . Возни-

кающие в неравновесных условиях кристаллизации и деформации фазы образуют с твердым раствором сплавов эвтектическую систему [5–7], частично растворяясь в нем и вызывая диффузионную пористость [3, 9].

Подход к оценке качества металлического материала по содержанию в нем избыточных фаз не является новым. Так, К.С. Чернявский указывает [8], что объемные доли неметаллических включений в стали или пор в спеченных материалах служат основными критериями качества, вследствие чего используются при заводском контроле этих материалов. Однако для алюминиевых сплавов соответствующие методики до сих пор не утверждены, и в ГОСТ Р 57125–2016 [10] их количественное описание отсутствует.

Цель работы — выявить закономерности количественного содержания избыточных фаз в алюминиевых сплавах системы Al–Mg со свойствами материала получаемых из них поковок, горячекатаных листов и других полуфабрикатов, в частности их коррозионной стойкости и сопротивляемости хрупкому разрушению.

Это важно, так как температура плавления образующихся из основных компонентов сплавов с содержанием более 1...2 % Mg фаз β и β' составляет соответственно 450 и 452 °С, а чистого алюминия 672 °С [2, 6], плавятся они конгруэнтно, а значит, могут быть лишь частично растворены в металлическом материале. Зависимости показателя V_v от температуры и степени накопленной деформации, а также их связь с твердостью материала, устанавливали на примере поковок из сплавов АМг3 и АМг6 [1].

Макрошлифы исходного прутка из сплава АМг3 и полученной из него путем нагрева до температуры 420 °С поковки после травления в растворе едкого натра и осветления разбавлен-

ной азотной кислотой по методике МР 21-31-69 [11] приведены на рис. 1. Использовали гидравлический пресс П2547 с насосно-аккумуляторным приводом и предельным усилием 50 МН при скорости перемещения подвижной траверсы 0,08...0,12 м/с. Проводили единичную и двойную осадку прутковых заготовок диаметром 100 мм и длиной 160 мм со степенью деформации $\varepsilon_{i1} = \varepsilon_{i2} = 50$ % и общей $\varepsilon_{\Sigma} = 75$ %. Для нагрева заготовок применяли электрическую печь с принудительной рециркуляцией атмосферы.

Температура нагрева составляла 320 °С или 420 °С. Время выдержки заготовок в печи назначали исходя из ОСТ 92-1619–87 [12]. Бойки пресса подогревали в электрической печи с выкатным подом до 300 °С. Время от выемки заготовок из печи до установки на нижний боек пресса принимали равным 10 с, а до первого касания заготовки верхним бойком условно отводили еще 5 с. Для моделирования осадки заготовок с определением расчетных значений деформаций и температур использовали основанный на методе конечных элементов программный продукт QForm [13].

Показатель V_v в материале образцов определяли планометрическим методом по ГОСТ 21073.4–75 [14], микротвердость материала измеряли по методике ГОСТ 9450–76 [15].

Влияние температуры и механизмов деформации на показатель V_v . Горячая пластическая деформация всегда протекает с участием двух условных механизмов — внутри- и межзеренного. Последний преобладает там, где локализуются напряжения растяжения и энергетически выгодные сдвиговые деформации [3, 16], способствуя образованию в материале пористости по механизму Портевена — Ле Шателлье [17].

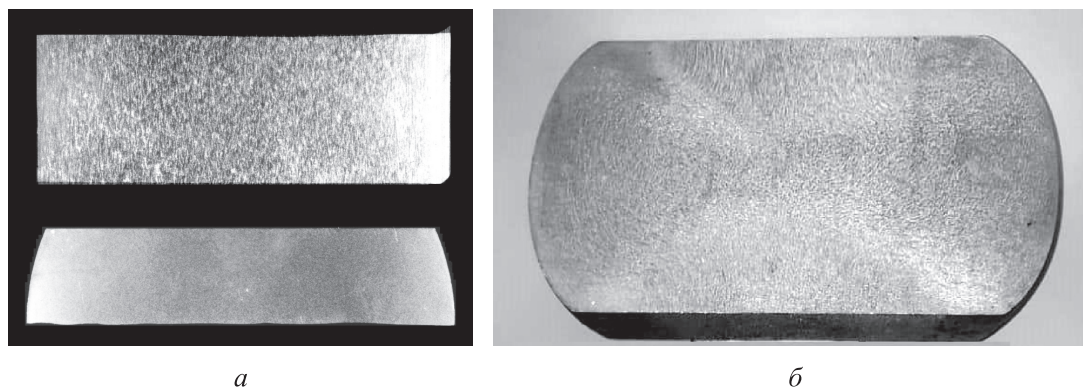


Рис. 1. Макроструктуры прутка (а) и поковки (б) из сплава АМг3

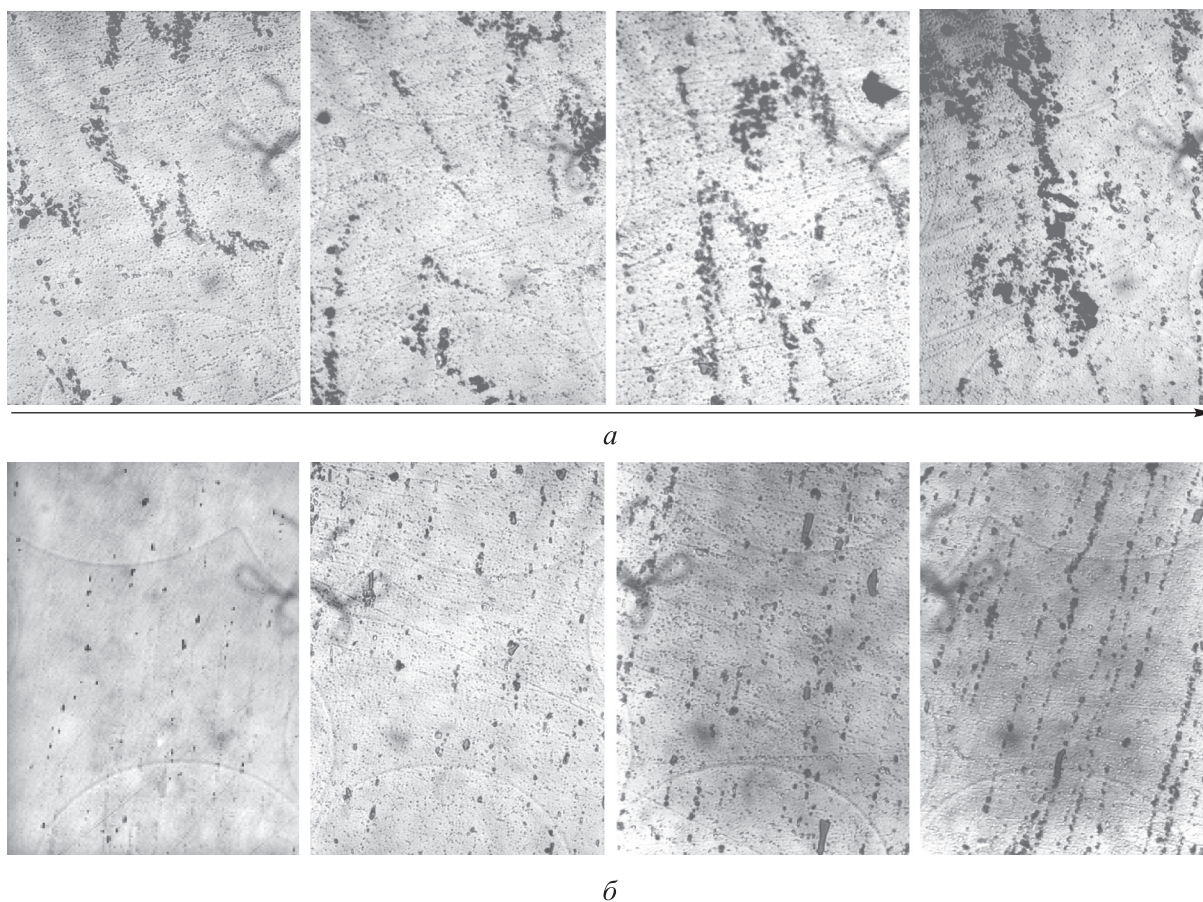


Рис. 2. Микроструктуры поковок из сплава АМг3 (при увеличении $\times 240$) в местах преобладания меж- (а) и внутризеренной (б) деформаций после нагрева до 420 °С по мере их увеличения

Таблица 1

Результаты исследования влияния деформаций и температур на содержание избыточных фаз и твердость материала поковки из сплавов АМг3 и АМг6

Сплав	Температура нагрева, °С	Преобладающая деформация	Логарифмическая деформация	Температура в точке, °С	Твердость, МПа	Показатель V_v , % ат.
АМг3	320	Внутризеренная	0,2...1,6	307	55...61	1,4...4,3
		Межзеренная	1,4...2,8	364	53...56	До 7,3
	420	Внутризеренная	0,2...1,6	395	49...54	До 9,6
		Межзеренная	1,4...2,8	457	45...48	До 13,1
Исходный пруток, долевое направление					53...71	3,7...4,1
АМг6	320	Внутризеренная	0,2...1,6	312	135...140	1,5...3,8
		Межзеренная	1,4...2,8	370	120...130	До 4,8
	420	Внутризеренная	0,2...1,6	403	115...121	До 6,2
		Межзеренная	1,4...2,8	462	108...115	До 7,3
Исходный пруток, долевое направление					105...143	3,3...3,7

Микроструктуры поковок в местах преобладания меж- и внутризеренной деформаций [9] показаны на рис. 2. Здесь фаза β' представлена

цепочками серо-черных включений, а фаза β трудно различима на фоне основного раствора материала, так как очень быстро вытравливает-

ся из него. Так, по данным В.П. Батракова [18], скорости растворения матрицы твердого раствора сплава АМг6 и β -фазы Mg_2Al_3 в 3%-ном водном растворе NaCl составляют 6 и 240 г/(м²·ч) соответственно. Из табл. 1 следует, что деформация при повышенных значениях температуры локально увеличивает показатель V_v , одновременно разрыхляя металлический материал и делая его менее твердым.

Так, наибольшая твердость замерена у краев прутка, а наименьшая — в его центре, где при прессовании скорость истечения материала выше, и преобладают напряжения растяжения [19]. Чтобы пояснить, как в материале могло образоваться такое количество интерметаллических веществ, рассмотрим химический состав сплавов АМг3 и АМг6 по ГОСТ 4784–2019 (табл. 2).

Содержание избыточных фаз в сплаве АМг3 существенно выше, чем в АМг6, что обусловлено большим допустимым содержанием железа, магния, кремния и отсутствием измельчающей присадки бериллия [1].

Для сплава АМг6 ГОСТ 4784–2019 допускает 0,5...0,8 Мп % масс., до 0,4 Si и Fe % масс., до 0,2 % масс. Zn, до 0,1 % масс. Cu и в сумме до 0,1 % масс. других примесей, всего до 1,3...1,6 % общей массы металлического материала. Сплав АМг3 может содержать следующие элементы, % масс: Mg — 0,3...0,6; Si —

0,3...0,6; Fe — 0,4; Zn — 0,2; Cu — 0,1; другие примеси в сумме — 0,1 [1]. Это составляет 1,4...2,0 % относительно общей массы металлического материала. Общее содержание примесных элементов в соединениях с основными компонентами сплава с учетом их большого множества — $AlFeSi$, $AlFeSiMn$, Fe_2SiAl_8 , $CuMg_4Al_6$, $(FeMn)Al_6$ и др. [2–7] — может достигать ~2,0 % общей массы для сплава АМг6 и ~2,5 % для сплава АМг3. Это количество не учитывает наличие фаз, образованных основными компонентами сплава, — Al и Mg. Так, в образцах из сплава АМг3 показатель V_v достигает 13 % при определении по методике ГОСТ 21073.4–75, превышая связанное с указанным в ГОСТ 4784–2019 количество примесей.

Однако локализация деформаций облегчает образование соединений с пониженной относительной плотностью, перетягивая туда необходимые химические элементы, и отражаясь в показателе V_v . Поэтому в местах локализованных деформаций, составляющих до ~10 % объема материала, становится возможным столь высокое содержание избыточных фаз, а с их растворением — и диффузионной пористости, снижающей твердость металлического материала.

Так, для поковок из сплава АМг3 микротвердость в поперечном сечении составила 46...55 МПа при разбросе 20 % относительно

Таблица 2

Химический состав сплавов АМг3 и АМг6 (по ГОСТ 4784–2019)

Элемент	Содержание, % масс.	Элемент	Содержание, % масс.
Для сплава АМг3		Для сплава АМг6	
Магний	3,20...3,80	Магний	5,80...6,80
Марганец	0,3...0,60	Марганец	0,50...0,80
Кремний	0,50...0,80	Кремний	0,40
Титан	0,10	Титан	0,02...0,10
Хром	0,05	Хром	–
Цинк	0,20	Цинк	0,20
Железо	0,50	Железо	0,40
Медь	0,10	Медь	0,10
Бериллий	–	Бериллий	0,0002...0,0050
Прочие: каждый в сумме	Не более 0,05 Не более 0,10	Прочие: каждый в сумме	Не более 0,05 Не более 0,10
Алюминий	Остальное	Алюминий	Остальное

минимума, а для сплава АМг6 — 108...140 МПа при разбросе 30 %. Наименьшая твердость имеет место в областях с преобладанием межзеренных локализованных деформаций, а наибольшая — в тех областях поковки, где больше внутризеренной деформации. Эта зависимость отражает важность ограничения повышающей показатель V_v межзеренной деформации [3, 9, 16] как численного критерия, оценить который можно путем сопоставления структуры материала поковки с результатами математического моделирования их образования.

Нежелательные проявления повышенного показателя V_v . При получении энергии материал зерна стремится повысить упорядоченность, вытесняя вовне дефекты и примеси разного рода, тем и образуя границы.

В местах образования границ скорость диффузии много больше внутризеренной [20], что способствует возникновению скоплений избыточных фаз, ускоренно образующихся при нагреве выше 350 °С и тем обедняющих твердый раствор [5]. Поэтому хорошие коррозион-

ные характеристики и герметичность материала достигаются при его деформации от нагрева не более 320 °С и удержании температуры в пределах 350...400 °С [3, 9].

Горячая деформация на верхнем рекомендованном ОСТ 92-1619-87 температурном пределе может привести к перегреву материала и даже вызвать разрушение заготовок [9, 21], как показано на рис. 3.

С учетом такой опасности документ прописывает возможность подстуживания заготовок [12], однако не объясняет причин их возможного разрушения. Показанные на рис. 3 трещины в осажженных после нагрева до 420 °С поковках расположены по плоскостям скольжения и заполнены легкоплавкой эвтектической фазой, состоящей из бинарных эвтектик Al-Mg, Al-Mg₂Al₃ и Al-Mg₅Al₈, тройной эвтектики Al-Mg₅Al₈-Mg₂Si и др. [2, 4-7].

В случае напряженно-деформированного состояния, близкого к всестороннему сжатию, вместо открытых трещин в металлическом материале часто имеют место скрытые расслоения. На рис. 4 приведен пример типичных рас-

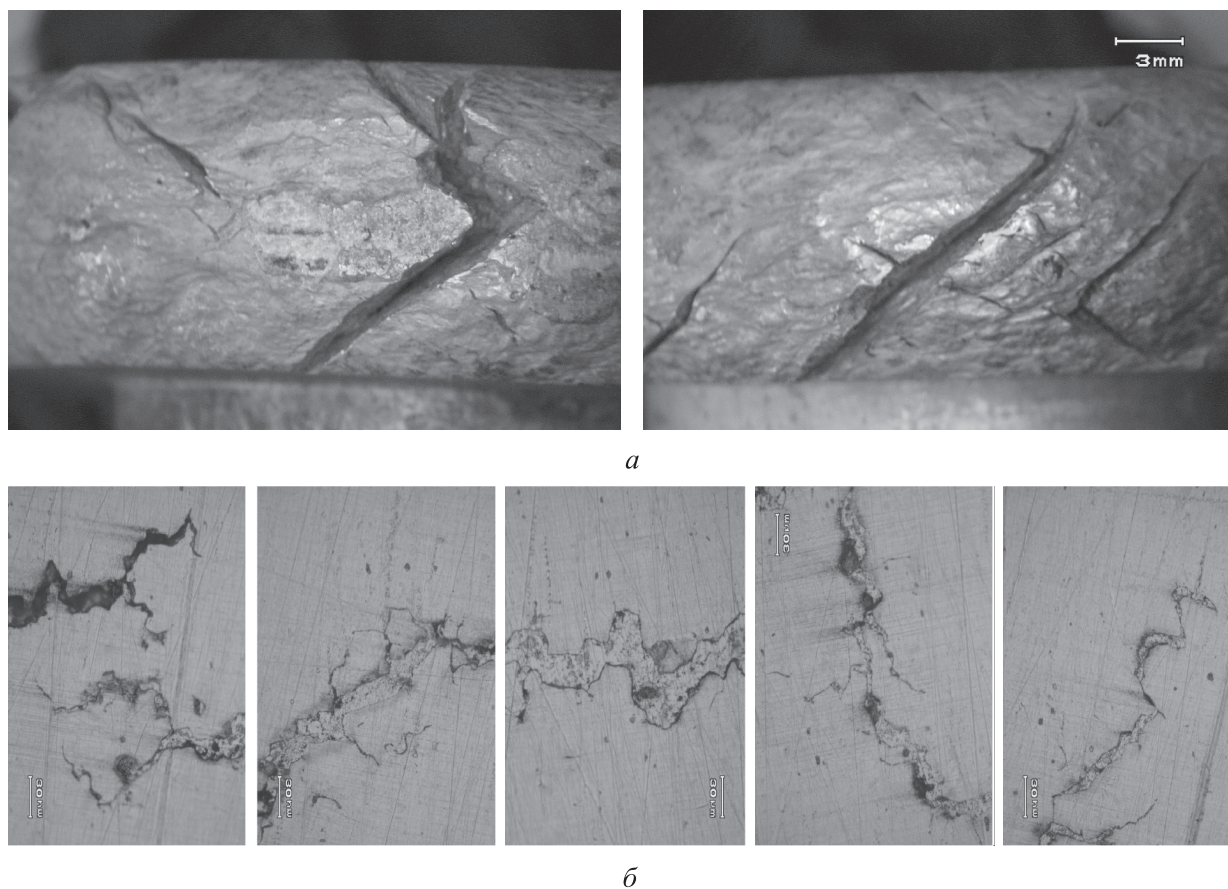


Рис. 3. Внешний вид трещин в поковках из сплава АМг6 (а) и их структура (б) при увеличении $\times 50$

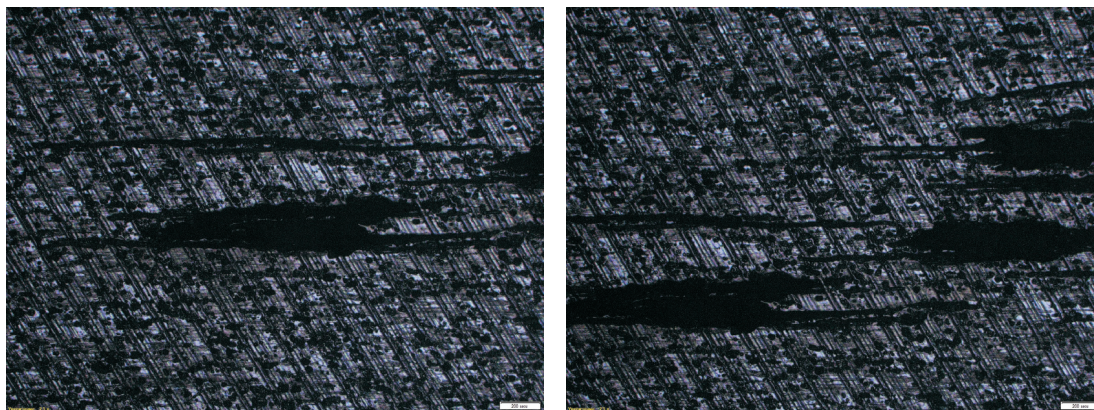


Рис. 4. Картины расслоений в местах локализованных сдвиговых деформаций материала штампованной поковки из сплава АМг6 при увеличении $\times 50$

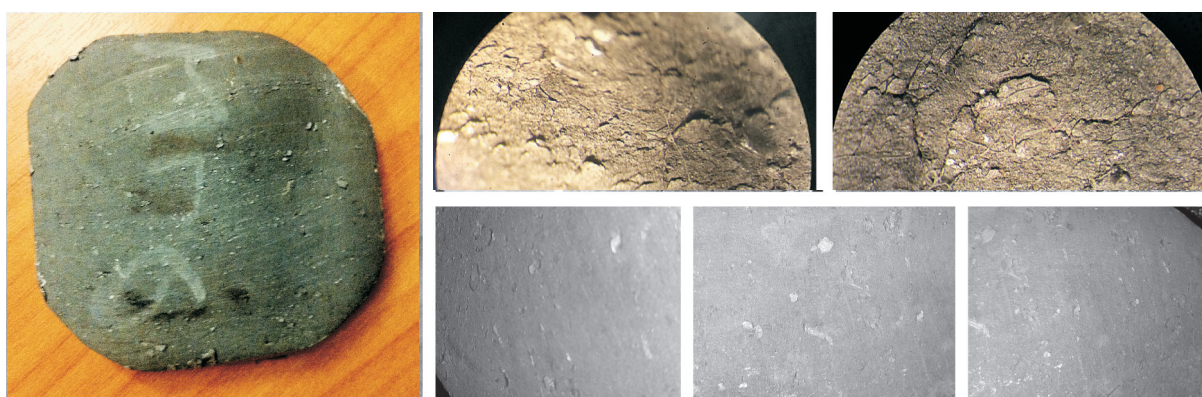


Рис. 5. Картины отшелушивания материала перегретой поковки из сплава АМг6

слоений в материале поволоков из сплава АМг6, возникающих в местах локализованных сдвиговых деформаций при их штамповке на гидравлическом прессе после нагрева до 420 °С.

Расслоения насыщены включениями избыточных фаз, так как последние имеют пониженную плотность, вследствие чего легко образуются в местах локализованных деформаций [3, 9, 21]. Температура нагрева заготовок соответствовала ОСТ 92-1619-87, однако материал поковки уже показывает повышенное значение показателя V_v .

В то же время указанная в ОСТ 92-1619-87 термическая обработка может быть недостаточной для необходимого растворения выделившихся избыточных фаз, как это описано в работах [22, 23], делая материал подверженным коррозионному и механическому разрушениям.

Еще одним проявлением повышенного значения показателя V_v является внешнее отшелушивание материала в виде чешуек, тем более активное, чем выше была температура материала поковки, как это показано на рис. 5. Вид коррозионных повреждений листа из сплава

АМг6 после нахождения в условиях неотопляемого помещения в течение 10 лет показан на рис. 6.

В данном случае электрохимическое взаимодействие цепочек электроотрицательных относительно основного материала соединений с воздушной влагой ускоряет разрушение материала [5].

Это означает, что процесс деформации должен быть построен так, чтобы ее локализация пресекалась на каждом последующем переходе, и тем ограничивалось образование и последующее растворение в металлическом материале избыточных интерметаллических соединений.

На рис. 7, а-г показаны полученные методом рентгенофлуоресцентного анализа [24] картины типового металлографического шлифа горячекатаного листа толщиной 10 мм из сплава АМг6 и распределения в нем Al, Mg и Fe. Светлый тон соответствует большему содержанию вещества и, наоборот. Видно, что в местах нахождения Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 , содержащих 37,3 и 36 % ат. [2], содержание алюминия падает, а магния возрастает. Повышенное значение

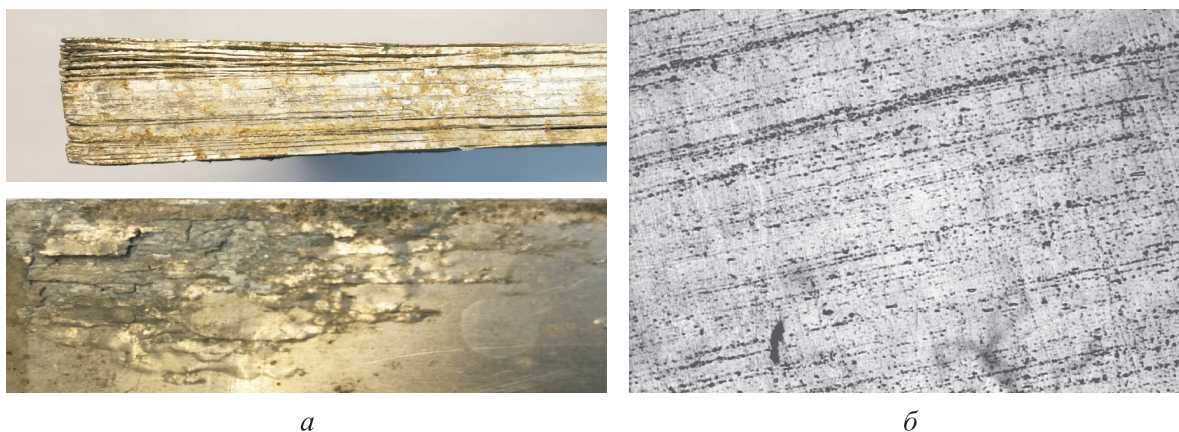


Рис. 6. Структура коррозионных повреждений листа из сплава АМг6 толщиной 10 мм (а) и его строчечная микроструктура до разрушения при увеличении $\times 120$ (б)

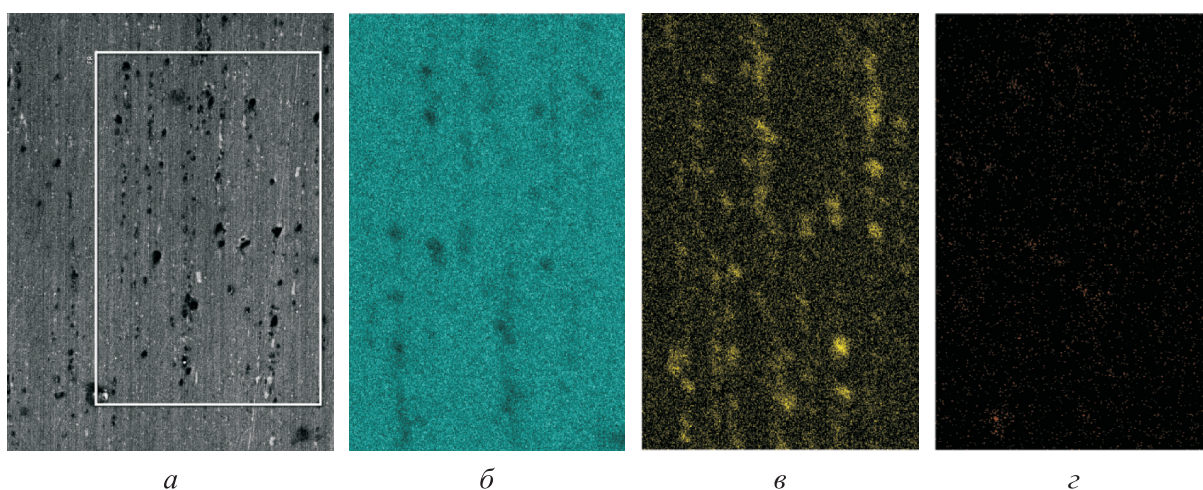


Рис. 7. Картины шлифа горячекатаного листа из сплава АМг6 при увеличении $\times 200$ (а) и распределения в нем Al (б), Mg (в) и Fe (г) с увеличением $\times 250$

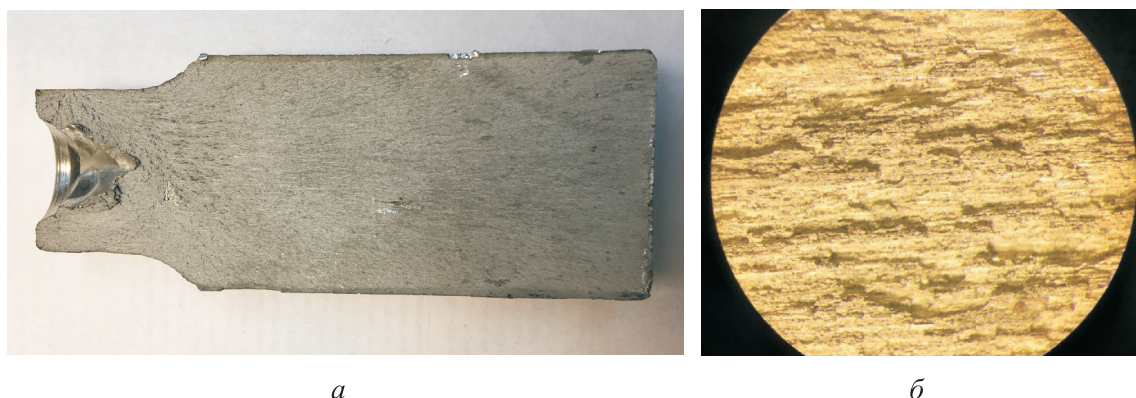


Рис. 8. Картина разрушения прутка из сплава АМг6 (а) и структура поверхности излома при увеличении $\times 16$ (б)

показателя V_v может облегчать и разрушение материалов под нагрузкой. На рис. 8 приведен пример хрупкого разрушения прессованного прутка диаметром 60 мм из сплава АМг6М [25] при его подпоре бабкой токарного станка, т. е. при относительно небольших нагрузках.

Если бы структура материала заготовки не была строчечной, и значение V_v было бы меньше, то такое разрушение было бы затруднено. Следует ограничивать вводимую в материал при его нагреве и деформации избыточную энергию, и с этой точки зрения показатель V_v

представляется комплексной величиной для оценки качества материалов из алюминий-магние-вых сплавов.

Выводы

1. Образование при горячей деформации сплавов группы АМг большого количества некогерентных с твердым раствором интерметаллических соединений повышает их склонность к межкристаллитной и расслаивающей коррозии, образованию микродефектов типа пор и расслоений, а также к хрупкому разрушению заготовок при незначительных нагрузках.

2. Конгруэнтное плавление интерметаллических соединений затрудняет их растворение в ходе деформации и термической обработки и ускоряет тем сильнее, чем больше показатель V_v .

3. Повышенное значение показателя V_v может способствовать разрушению материала во времяковки, когда трещины будут направлены по плоскостям скольжения и заполнены легкоплавкой эвтектикой.

4. Если распределение нагрузок препятствует непосредственному разрушению заготовок, как это может быть при штамповке, то повышенное значение показателя V_v указывает на опасность образования расслоений в местах локализации сдвиговых деформаций.

5. Простое металлографическое определение показателя V_v по методике ГОСТ 21073.4–75 позволяет заранее оценить качество материала по герметичности, коррозионной стойкости, сопротивлению разрушению и др.

6. Повышенное значение показателя V_v в местах локализованных деформаций обусловлено перемещением легирующих компонентов и примесей из мест преобладания напряжений сжатия в места с наибольшим уровнем напряжений растяжения и их вовлечением в образование избыточных фаз.

7. Преимущественное протекание внутризеренной горячей деформации и ограничение межзеренной деформации позволяет удерживать показатель V_v материала в обусловленных его целевым назначением пределах.

Литература

- [1] ГОСТ 4784–2019. *Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки*. Москва, Стандартинформ, 2019. 31 с.
- [2] Мондольфо Л.Ф. *Структура и свойства алюминиевых сплавов*. Москва, Металлургия, 1979. 640 с.
- [3] Галкин В.И., Головкин П.А. О влиянии механизмов деформации на структуру и свойства металлического материала. *Упрочняющие технологии и покрытия*, 2021, № 5, с. 207–214.
- [4] Осинцев О.Е., Никитин С.Л. *Высокопрочные коррозионностойкие литейные алюминиевые сплавы системы Al-Mg с повышенным содержанием кремния*. Москва, МАТИ, 2008. 263 с.
- [5] Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. *Коррозия и защита алюминиевых сплавов*. Москва, Металлургия, 1986. 368 с.
- [6] Фридляндер И.Н., ред. *Металловедение алюминия и его сплавов*. Москва, Металлургия, 1983. 279 с.
- [7] Арсентьев П.П., Коледов Л.А. *Металлические расплавы и их свойства*. Москва, Металлургия, 1976. 375 с.
- [8] Чернявский К.С. *Стереология в металловедении*. Москва, Металлургия, 1977. 279 с.
- [9] Головкин П.А. О факторе количественного содержания интерметаллидных фаз в природе разрушения поковок из сплава АМз6. Москва, Технология легких сплавов, 2022, № 2, с. 15–19, doi: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2022-2-15-19>
- [10] ГОСТ Р 57125–2016. *Прессованные изделия из алюминиевых сплавов. Термины и определения дефектов*. Москва, Стандартинформ, 2016. 46 с.
- [11] МР 21-31-69. *Методическая рекомендация. Выявление макро- и микроструктуры алюминия и его сплавов методом химического травления*. Москва, ВИЛС, 1969. 9 с.
- [12] ОСТ 92-1619–87. *Заготовки штампованные из алюминиевых сплавов. Типовой технологический процесс горячей объемной штамповки*. Москва, ВИАМ, ОНТИ, 1985. 44 с.
- [13] Электронный ресурс: qform3d.ru
- [14] ГОСТ 21073.4–75. *Металлы цветные. Определение величины зерна планометрическим методом*. Москва, Изд-во стандартов, 2002. 24 с.

- [15] ГОСТ 9450–76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. Москва, Изд-во стандартов, 1976. 36 с.
- [16] Головкин П.А. Механизмы деформации металлов и сплавов, используемых в электровакуумных СВЧ-приборах. *Металлообработка*, 2020, № 5–6, с. 27–34, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2020.5-6.27>
- [17] Пригожин И., Дефэй Р. *Химическая термодинамика*. Новосибирск. Наука. Сиб. отделение, 1966. 509 с.
- [18] Батраков В.П. *Проблемы морской коррозии. В: Коррозия и защита сплавов в морских условиях*. Москва, ВИАМ, 1985, с. 6–22.
- [19] Каргин В.Р., Гречникова А.Ф., Ерисов Я.А. и др. *Теория и технология прессования алюминиевых сплавов*. Самара, СГАУ, 2015. 80 с.
- [20] Дриц М.Е., Корольков А.М., Гук Ю.П. и др. *Разрушение алюминиевых сплавов при растягивающих напряжениях*. Москва, Наука, 1973. 215 с.
- [21] Головкин П.А. *Контроль на пережог поковок из алюминиевого сплава АМг6*. Москва, Технология легких сплавов, 2023, № 1, с. 90–96, doi: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2023-1-90-96>
- [22] Захаров В.В. *Разработка научных основ легирования алюминиевых сплавов, предназначенных для прессования, и термической обработки слитков из них*. Москва, ВИЛС, 1988. 45 с.
- [23] ТР 50-31-70. *Технологическая рекомендация. Гомогенизация слитков алюминиевых сплавов*. Москва, ВИЛС, 1970. 24 с.
- [24] Абрамов А.В., Пупышев А.А. *Рентгенофлуоресцентный анализ*. Екатеринбург, УрФУ, 2017. 96 с.
- [25] ГОСТ 21488–2025. *Прутки прессованные из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия*. Москва, Российский институт стандартизации, 2025. 32 с.

References

- [1] GOST 4784–2019. *Alyuminiy i splavy alyuminievye deformiruemye. Marki* [Aluminium and wrought aluminium alloys. Grades]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 31 p. (In Russ.).
- [2] Mondolfo L.F. Aluminum alloys. structure and properties. Butterworth, 1976. 971 p. (Russ. ed.: *Struktura i svoystva alyuminievyykh splavov*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 640 p.)
- [3] Galkin V.I., Golovkin P.A. About influence of deformation mechanisms on the structure and properties of metallic material. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2021, no. 5, pp. 207–214. (In Russ.).
- [4] Osintsev O.E., Nikitin S.L. *Vysokoprechnye korrozionnostoykie liteynye alyuminievye splavy sistemy Al-Mg s povyshennym sodержанием kremniya* [High-strength corrosion-resistant cast aluminum alloys of the Al-Mg system with increased silicon content]. Moscow, MATI Publ., 2008. 263 p. (In Russ.).
- [5] Sinyavskiy V.S., Valkov V.D., Kalinin V.D. *Korroziya i zashchita alyuminievyykh splavov* [Corrosion and protection of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 368 p. (In Russ.).
- [6] Fridlyander I.N., ed. *Metallovedenie alyuminiya i ego splavov* [Metallurgy of aluminum and its alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 279 p. (In Russ.).
- [7] Arsentyev P.P., Koledov L.A. *Metallicheskie rasplavy i ikh svoystva* [Metallic melts and their properties.]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976. 375 p. (In Russ.).
- [8] Chernyavskiy K.S. *Stereologiya v metallovedenii* [Stereology in metallurgy.]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 279 p. (In Russ.).
- [9] Golovkin P.A. About the factor of quantitative content of intermetallic phases in the nature of destruction of AMg6 alloy open forgings. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2022, no. 2, pp. 15–19, doi: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2022-2-15-19> (in Russ.).
- [10] GOST R 57125–2016. *Pressovannye izdeliya iz alyuminievyykh splavov. Terminy i opredeleniya defektov* [Aluminium alloy extruded products. Terms and definitions of defects]. Moscow, Standartinform Publ., 2016. 46 p. (In Russ.).
- [11] MR 21-31-69. *Metodicheskaya rekomendatsiya. Vyyavlenie makro-i mikrostruktury alyuminiya i ego splavov metodom khimicheskogo travleniya* [Methodological recommendation. Detection of macro- and microstructure of aluminum and its alloys by chemical etching]. Moscow, Standartinform Publ., 2021. 12 p. (In Russ.).

- tion. Identification of the macro- and microstructure of aluminum and its alloys by chemical etching.]. Moscow, VILS Publ., 1969. 9 p. (In Russ.).
- [12] OST 92-1619–87. *Zagotovki shtampovannye iz alyuminievykh splavov. Tipovoy tekhnologicheskiy protsess goryachey obemnoy shtampovki* [Stamped billets made of Aluminium alloys. Typical technological process of volume hot forging]. Moscow, VIAM, ONTI Publ., 1985. 44 p. (In Russ.).
- [13] qform3d.ru
- [14] GOST 21073.4–75. *Metally tsvetnye. Opredelenie velichiny zerna planometricheskim metodom* [Non-ferrous metals. Determination of grain size by planimetric method.]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2002. 24 p. (In Russ.).
- [15] ГОСТ 9450–76 *Measurement of microhardness by indentation with diamond tips*. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2002. 36 p. (In Russ.).
- [16] Golovkin P.A. Mechanisms of deformation of metals and alloys, used in electric vacuum microwave devices. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2020, no. 5–6, pp. 27–34, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2020.5-6.27> (in Russ.).
- [17] Prigozhin I., Defey R. *Chemical thermodynamics*. Novosibirsk. Nauka Publishing House, Siberian branch. 1966, 509 p.
- [18] Batrakov V.P. Problemy morskoy korrozii [Problems of marine corrosion.]. V: *Korroziya i zashchita splavov v morskikh usloviyakh* [In: Corrosion and protection of alloys in marine conditions]. Moscow, VIAM Publ., 1985, pp. 6–22. (In Russ.).
- [19] Kargin V.R., Grechnikova A.F., Erisov Ya.A. et al. *Teoriya i tekhnologiya pressovaniya alyuminievykh splavov* [Theory and technology of pressing aluminum alloys.]. Samara, SGAU Publ., 2015. 80 p. (In Russ.).
- [20] Drits M.E., Korolkov A.M., Guk Yu.P. et al. *Razrushenie alyuminievykh splavov pri rastyagivayushchikh napryazheniyakh* [Fracture of aluminum alloys under tensile stresses]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 215 p. (In Russ.).
- [21] Golovkin P.A. Control on overburning of amg6 aluminum alloy open forgings. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2023, no. 1, pp. 90–96, doi: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2023-1-90-96> (in Russ.).
- [22] Zakharov V.V. *Razrabotka nauchnykh osnov legirovaniya alyuminievykh splavov, prednaznachennykh dlya pressovaniya, i termicheskoy obrabotki slitkov iz nikh* [Development of scientific principles for alloying aluminum alloys intended for extrusion and heat treatment of ingots made from them]. Moscow, VILS Publ., 1988. 45 p. (In Russ.).
- [23] TR 50-31-70. *Tekhnologicheskaya rekomendatsiya. Gomogenizatsiya slitkov alyuminievykh splavov* [Technological recommendation. Homogenization of aluminum alloy ingots]. Moscow, VILS Publ., 1970. 24 p. (In Russ.).
- [24] Abramov A.V., Pupyshev A.A. *Rentgeno fluoresstentnyy analiz* [X-ray fluorescence analysis]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2017. 96 p. (In Russ.).
- [25] GOST 21488–2025. *Prutki pressovannye iz alyuminiya i alyuminievykh splavov. Tekhnicheskie usloviya* [Pressed bars of aluminium and aluminium alloys. Specifications]. Moscow, Rossiyskiy institut standartizatsii Publ., 2025. 32 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 02.11.2025

Информация об авторе

ГОЛОВКИН Павел Александрович — кандидат технических наук, ведущий инженер. ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва» (141070, Королёв, Московская область, Российская Федерация, ул. Ленина, д. 4а, e-mail: pavelgolovkin527@gmail.com).

Information about the author

GOLOVKIN Pavel Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Leading Engineer. Public Joint Stock Company “Rocket and Space Corporation “Energia” named by S.P. Korolev” (141070, Korolev, Moscow Region, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 4a, e-mail: pavelgolovkin527@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Головкин П.А. Количество избыточных фаз как один из критериев качества сплавов системы Al–Mg. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 10, с. 48–57.

Please cite this article in English as:

Golovkin P.A. Quantity of excess phases as one of the quality criteria for alloys of the Al–Mg system. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 10, pp. 48–57.