

**ВЛИЯНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ФАЗ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ  
ЛИСТОВ И ПЛИТ ИЗ СПЛАВА АМг6**

**П.А. Головкин, к.т.н.**

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

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

**INFLUENCE OF INTERMETALLIC PHASES ON CORROSION RESISTANCE OF  
SHEETS AND PLATES OF Al-6%Mg ALLOY**

**P.A. Golovkin, Ph. D.**

Pluton JSC, 11 Nizhnyaya Syromyatnicheskaya St., Moscow, 105120, Russia.

[p.golovkin@pluton.msk.ru](mailto:p.golovkin@pluton.msk.ru); tel.: (495) 730-36-19

**Аннотация:**

Рассматривается связь между количественным содержанием интерметаллидных фаз (КСИФ) и коррозионной стойкостью материала горячекатаных листов и плит из алюминиево-магниевого сплава АМг6. Показано, что наибольшее влияние на коррозионные свойства материалов оказывают интерметаллические соединения  $Mg_2Al_3$  и  $Mg_5Al_8$ , образующиеся из основных компонентов сплава, и которые можно классифицировать как фазы горячей обработки. Повышение равномерности и снижение температуры деформации материала заявляются как действенное средство ограничения в нём КСИФ, и ограничения развития коррозионных повреждений.

*Ключевые слова: алюминиевый сплав, материал, горячекатаные листы и плиты, интерметаллиды, фазы горячей обработки, температура, коррозионная стойкость.*

**Abstract:**

The relationship between the quantitative content of intermetallic phases (QCOIP) and the material corrosion resistance of hot-rolled sheets and plates made of aluminium-magnesium alloy Al-6%Mg "AMg6" is considered. It is shown that the greatest influence on the corrosion properties of materials is exerted by intermetallic compounds  $Mg_2Al_3$  and  $Mg_5Al_8$ , formed from the main components of the alloy, and which can be classified as hot work phases. Increasing the uniformity and lowering the deformation temperature of the material is claimed as an effective means of limiting QCOIP in it, and limiting the development of corrosion damage.

*Keywords: aluminium alloy, material, hot-rolled sheets and plates, intermetallides, hot processing phases, temperature, corrosion resistance.*

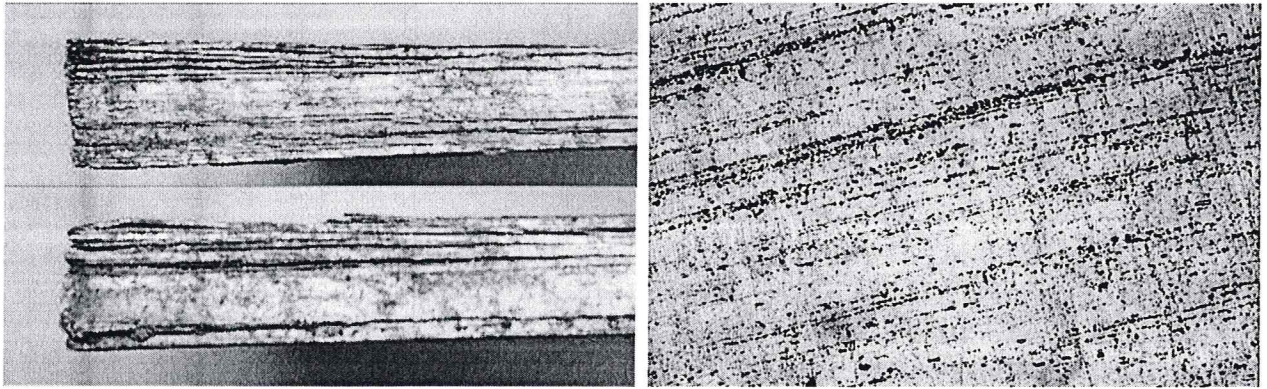
### Общие положения

Имеющие место в алюминиево-магниевом сплаве АМг6, химический состав которого определён ГОСТ 4784 [1] интерметаллические фазы, можно условно разделить на две основные группы. Первую образуют соединения, образующиеся, преимущественно, в процессе приготовления исходного расплава. Они состоят из соединений основных компонентов сплава и примесей Fe, Si, Cr и Cu, и включают  $Mg_2Si$ ,  $AlFeSi$ ,  $AlFeSiMn$ ,  $Fe_2SiAl_8$ ,  $CuMg_4Al_6$ ,  $(CrFe)_4Si_4Al_{13}$ ,  $(FeMn)Al_6$  и другие [2, 3], общее содержание которых существенно зависит от химической чистоты сплава. Вторую группу соединений образуют интерметаллиды  $Mg_2Al_3$  и  $Mg_5Al_8$  [2, 3], образующиеся исключительно из основных составляющих сплава, отчего ресурс возникновения их теоретически не ограничен. Возникая преимущественно в неравновесных условиях деформации, эти соединения оказывают большое влияние на его структуру и свойства материала. Более электроотрицательные относительно твёрдого раствора фазы образуют с ним эвтектическую систему [2, 3], располагаясь по границам и у тройных стыков зёрен в виде оторочек и цепочек отдельных включений.

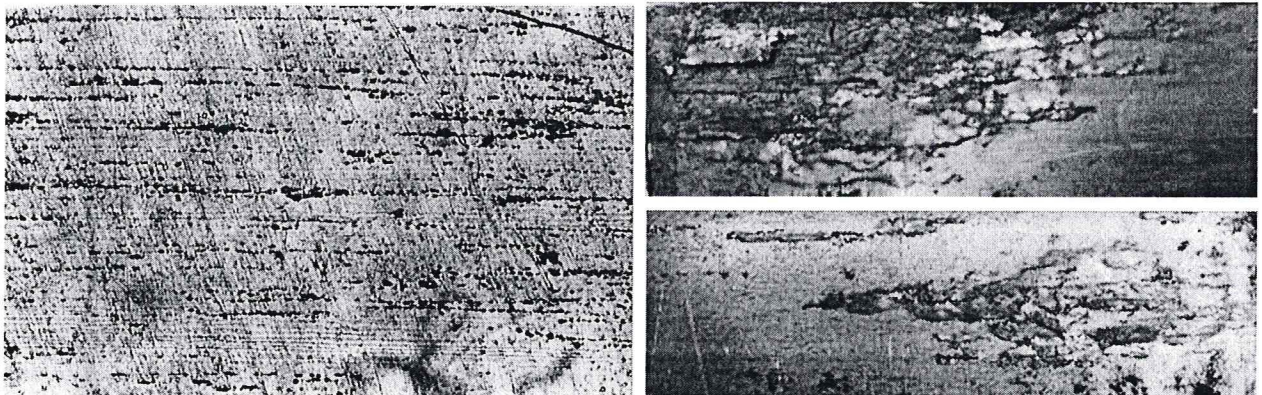
Для образования соединений  $Mg_2Al_3$  и  $Mg_5Al_8$  достаточно нахождения в материале от 1% магния, при содержании его более 3...4 % этот процесс резко усиливается [3], и происходит тем активнее, чем выше температура и неравномерность деформации [4, 5], и чем большую роль в процессе деформации играет её межзёренный механизм [6]. Для учёта соединений, как первого, так и второго типа, целесообразно использовать показатель количественного содержания интерметаллидных фаз – КСИФ, выражаемый в процентах по массе от общей массы металлического материала [7].

Алюминиды магния  $Mg_2Al_3$  и  $Mg_5Al_8$ , имеют температуры плавления 450 и 452 °С соответственно, что равно или выше температуры эвтектики в системе алюминий-магний, и при этом плавятся конгруэнтно [2, 3], а значит, имеют свойства накапливаться. Это также значит, что повышенное содержание этих соединений, с учётом их электроотрицательности, представляет существенную угрозу коррозионной стойкости металлического материала [8, 9]. Для её ослабления температура деформации сплава АМг6 не должна превышать 380...400 °С, при её превышении следует применять гомогенизирующий отжиг [8, 9]. Такой отжиг снижает уровень напряжений в материале, и в частности, между интерметаллическими включениями и окружающей их матрицей, но не может разрушить или растворить их, и потому центры развития коррозионных повреждений в нём сохраняются. Однако действующие стандарты недостаточно учитывают этот момент.





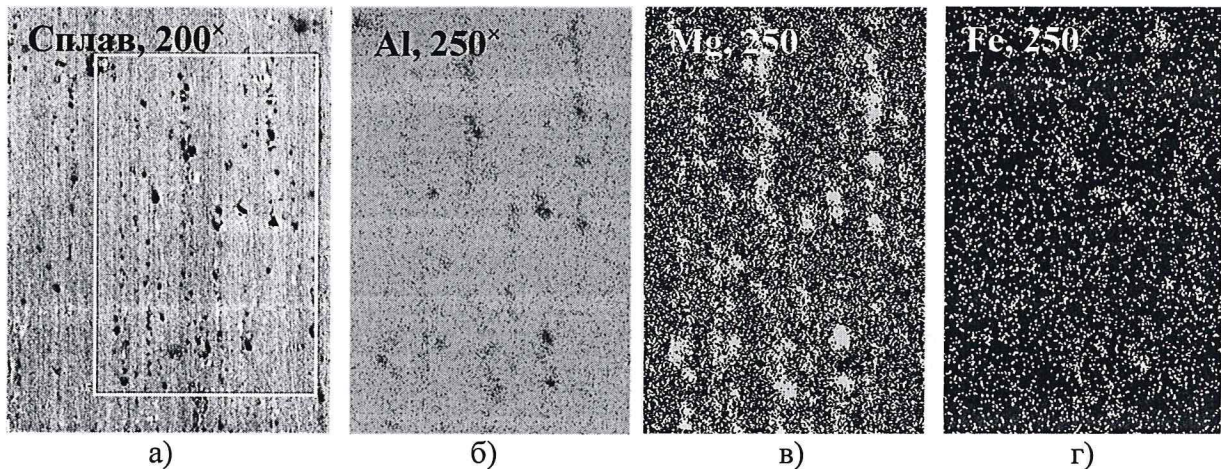
**Рисунок 1. Коррозионное расслоение материала листа из сплава АМгб толщиной 10 мм и его строчечная микроструктура до разрушения, 120<sup>×</sup>**



**Рисунок 2. Строчки интерметаллидов в материале листа (слева, 240<sup>×</sup>) и строчечное коррозионное поражение его поверхности (справа, 2<sup>×</sup>).**

Например, в то время, как распространяющий действие технологию изготовления поковок и штамповок, ОСТ 92-1619 [10] ограничивает верхний предел температуры их деформации величиной 450 °С, для горячей прокатки такие определяющие отраслевые документы отсутствуют. Между тем, металлография горячекатаных листов и плит из сплава АМгб показывает кратное колебание этого показателя не только в рамках различных их партий, но и в высотном направлении одного образца, тем ярче, чем больше его толщина, и большее содержание фаз обработки делает ярко выраженной строчечную структуру материала листов [11] и плит [12], способствуя их коррозионному повреждению. Вид торцев листа из сплава АМгб толщиной 10 мм с повреждениями, которые соответствуют наибольшим 9 и 10 баллам по классификации ГОСТ 9.904 [13] после нахождения в течение нескольких месяцев в условиях не отапливаемого помещения приведён на рисунке 1.





**Рисунок 3. Распределение Al, Mg и Fe в материале поковки 2015 года.**

Вид повреждений на поверхности листа после 10 лет нахождения в отопляемом помещении представлен на рисунке 2, и отвечает коррозии металла на уровне С5, по определению ГОСТ Р 9.414 [14], то есть наибольшей степени отслаивания металлического материала в предпочтительном направлении, каковым выступает направление прокатки. Сопоставление микроструктур и коррозионных повреждений металлического материала показывает, что повышенное значение показателя КСИФ предопределяет склонность материала к коррозионным повреждениям, и наоборот.

Обрисовать некоторые причины повышенной повреждаемости материала с повышенным КСИФ можно с помощью фотографий, представленных на рисунке 3. Здесь методом рентгенофлуоресцентного анализа [15] показано распределение в образце из сплава АМг6 основных его составляющих – алюминия (3б) и магния (3в), а также примеси железа (3г), в сравнении с фотографией протравленного металлографического шлифа (3а), полученной с использованием входящего в состав исследовательской установки электронного микроскопа. Более светлый тон фотографии отвечает большему содержанию вещества, и наоборот.

Хорошо видно, что в местах нахождения алюминидов магния  $Mg_2Al_3$  и  $Mg_5Al_8$  относительное содержание алюминия в сплаве падает, а магния – возрастает в соответствии с химической формулой этих соединений. В то же время, расположение связанных с показателем химической чистоты металлического материала примесей железа, напрямую не связано с указанными примесями горячей обработки, что дополнительно указывает на различную природу их возникновения.

Образующиеся при горячей обработке материала соединения  $Mg_2Al_3$  и  $Mg_5Al_8$  искажают энергетическое поле его твёрдого раствора, своей повышенной электроотрицательностью [8, 9] делая его склонным к развитию коррозионных повреждений, при том, что изначально сплавы системы Al-Mg разрабатывались как коррозионностойкие. Известный справочник [16] непосредственно сплав АМгб характеризует как обладающий повышенной коррозионной стойкостью, в отожжённом состоянии не склонный к коррозионному растрескиванию и межкристаллитной коррозии, и склонный к расслаивающей коррозии не более, чем на уровне балла 3 по ГОСТ 9.018, предшествующего действующему ГОСТ 9.904. Также указано, что технологические и эксплуатационные нагревы не вызывают снижения сопротивления коррозионному растрескиванию материала, когда отжиг при 310...335 °С устраняет его склонность к коррозионному растрескиванию и снижает склонность к межкристаллитной коррозии после нагревов [16]. В то же время мы видим, что повышенное значение КСИФ сильно ухудшает коррозионные свойства сплава. Так, представленный на фотографиях рисунков 1 и 2 материал обладает КСИФ, составляющим около 4,5 % от его массы, определённым стандартным методом по ГОСТ 21073.4 [17]. Материал с меньшим содержанием интерметаллических соединений, находящимся в пределах около 1,5...2 % по массе образца, показывает меньшую склонность к коррозионным поражениям.

Важно указать, что предписанные [16] режимы отжига не снимают склонности материала с повышенным значением КСИФ, поскольку не достигают температуры плавления алюминидов магния, как это было указано выше. А значит, и нанесение специальных покрытий на поверхность получаемых из алюминиево-магниевых сплавов деталей, также не гарантирует их достаточную коррозионную стойкость [17]. Это обстоятельство может быть обстоятельством может быть объяснено, в частности, тем, что действующий ОСТ 92-1017 [18], определяющий методику проведения металлографического контроля алюминиевых сплавов на пережог, имеет в себе некоторые противоречия. А именно. В пункте 1 приложения 1 этого документа указано, что «Пережог - это оплавление границ зёрен и структурных составляющих сплава при нагреве до температур, превышающих линию солидуса – может возникнуть при нагреве заготовок под деформацию, в процессе самой деформации и при нагреве под закалку и отжиг». То есть, в материале из сплава АМгб пережог может произойти уже при температурах выше температуры плавления эвтектического соединения  $Mg_2Al_3$ , как было указано ранее, составляющей 450 °С.





## **Выводы**

1. Особенностью алюминиево-магниевых сплавов группы АМг, и в частности, АМгб, является склонность к образованию в процессе деформационной обработки интерметаллических соединений, состоящих исключительно из основных компонентов твёрдого раствора, а именно,  $Mg_2Al_3$  и  $Mg_5Al_8$ . Количественно их образование теоретически не ограничено, и напрямую связано с интенсивностью и неравномерностью деформационной обработки металлического материала.

2. Поскольку образование соединений  $Mg_2Al_3$  и  $Mg_5Al_8$  напрямую не связано с чистотой химического состава металлического материала, для обособления от других интерметаллидов, образование которых связано с содержащимися в исходном расплаве примесями, их целесообразно классифицировать как фазы горячей обработки, таким образом, подчёркивая природу их возникновения.

3. Количественное содержание интерметаллидных фаз в металлическом материале целесообразно учитывать в виде одноимённого показателя КСИФ. В зависимости от величины этого показателя, могут существенно различаться по своим свойствам, в частности, стойкости к развитию коррозионных повреждений.

4. Повышенное значение КСИФ в материалах из сплава АМгб и других сплавов группы АМг, могут быть причиной их повышенной склонности к развитию коррозионных повреждений, и в частности, расслаивающей коррозии, в условиях, когда в ходе горячей обработки были превышены температуры плавления алюминидов магния  $Mg_2Al_3$  и  $Mg_5Al_8$ , но признаки пережога даже в начальной его стадии, ещё не проявились, и он по методике ОСТ 92-1017 должен быть признан годным.

5. Для наилучшей сопротивляемости коррозионным процессам материала горячекатаных листов и плит из алюминиево-магниевых сплавов, и в частности, сплава АМгб, а также для недопущения развития в их материале признаков пережога, необходимо обеспечить по возможности наименьшее значение КСИФ и наиболее равномерное их распределение в металлическом материале, ограничивая температуру нагрева заготовок перед прокаткой величиной 380...400 °С.

## **Библиографический список**

1. ГОСТ 4784-2019 Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки / –М.: Стандартиформ, 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.: Metallurgia, 1983. -280 с.

3. Л.Ф. Мондольфо / Структура и свойства алюминиевых сплавов / пер. с англ. / – М.: Металлургия, 1979. -640 с.
4. П.А. Головкин / Влияние режимов горячей деформации на коррозионные свойства сплавов АМг3 и АМг6 / –М.: Коррозия: материалы, защита, 2005, № 7, с. 2...5.
5. П.А. Головкин / Управление деформированной структурой алюминиево-магниевого сплава / –М.: Технология металлов, 2005, № 11. с. 10...16.
6. 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.
7. Головкин П.А. / Повышение качества корпусов микросборок электронных СВЧ-приборов с использованием ковочных операций / –М.: Технология машиностроения, 2020, № 9, с. 5...7.
8. В.С. Синявский, В.В. Истомина, 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.
9. С.М. Амбарцумян, Н.Б. Кондратьева, др. / Коррозионная стойкость свариваемых алюминиевых сплавов системы Al-Mg / Алюминиевые сплавы. Свариваемые сплавы / Тр. ВИАМ, вып. 6 / –М.: Металлургия, 1969, с. 27...36.
10. ОСТ 92-1619-87 / Заготовки штампованные из алюминиевых сплавов. Типовой технологический процесс горячей объемной штамповки / –М.: ЦНИИТМаш, 1987. -44 с.
11. ГОСТ 21631-76 / Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия / –М.: Стандартинформ, 2008. -29 с.
12. ГОСТ 17232-99 / Плиты из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия / –М.: Издательство стандартов, 2000. -12 с.
13. ГОСТ 9.904-82 / Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию / Взамен ГОСТ 9.018-74 с 01.07.1983 г. / –М.: Издательство стандартов, 1983. -11 с., изм.
14. ГОСТ Р 9.414-2012 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида / –М.: Стандартинформ, 2014. -45 с.
15. 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.



16. Авиационные материалы. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Справочник в 9 т. / Том 4, часть 1, книга 1 / Под общ. ред. чл.-кор. АН СССР А. Т. Туманова / -6-е изд., перераб. и доп. / -М.: ВИАМ, ОНТИ, 625 с, изм.

17. ГОСТ 21073.4-75 / Металлы цветные. Определение величины зерна планометрическим методом / -М.: Издательство стандартов, 2002. -24 с., с 20...24.

18. ОСТ 92-1017-79 / Сплавы алюминиевые деформируемые. Методика металлографического контроля на пережог / -М.: ВИАМ, ОНТИ, 1979. -25 с.

19. Головкин П.А. / Повышение качества корпусов микросборок из сплавов группы АМг управлением количественного содержания в их материале интерметаллических соединений / -С.-Пб.: Политехника, Металлообработка, 2022, № 1 (127)/2022, стр. 43...50.

20. Головкин П.А., Крюков А.В. Обеспечение вакуумной плотности корпусов микросборок электронных СВЧ- приборов из алюминиево-магниевых сплавов на этапе механической обработки / -М.: Технология машиностроения, 2022, № 9, с. 11...16.

21. 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.