

УДК 691.771; 621.77; 620.193.2

Некоторые причины повышенной коррозионной повреждаемости листов и плит из сплава АМГ6

П.А. Головкин

АО «Долгопрудненское конструкторское бюро автоматики»

Some causes of increased corrosion damage of Al-6%Mg alloy sheets and plates

P.A. Golovkin

Dolgoprudnensky Design Bureau of Automation

Рассмотрена связь между количественным содержанием избыточных фаз и коррозионной стойкостью материала горячекатаных листов и плит, выполненных из алюминиевого сплава АМГ6. Показано, что наибольшее влияние на коррозионные свойства материалов оказывают образующиеся из основных компонентов сплава интерметаллические соединения Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 . На примерах показано, что рассмотрение даже алюминия высокой чистоты как анизотропного материала искажает оценку его коррозионных свойств, тем более это важно для промышленных сплавов. Хотя давно проработаны научные подходы, учитывающие влияние вида структуры и интерметаллических соединений на коррозионные свойства различных материалов из алюминиевых сплавов, разные нормативные документы и исследования специалистов часто оказываются разобщены. В частности, это касается отраслевых стандартов ОСТ 92-1619-87 и ОСТ 92-1017-79, вследствие чего в производство под видом качественных могут попасть материалы, имеющие не выявленные признаки пережога. В качестве мер ограничения количества образующихся в материале избыточных фаз и связанных с ними возможных коррозионных повреждений предложено повысить равномерность и снизить температуру его деформации.

EDN: DVXNCD, <https://elibrary/dvxncd>

Ключевые слова: пережог материала, коррозионная повреждаемость, алюминиевый сплав, горячекатаные листы и плиты, избыточные фазы, коррозионные свойства

The between the quantitative content of excess phases and the corrosion resistance of the material of hot-rolled sheets and plates made of aluminum alloy Al-6% Mg AMr6 is considered. It has been shown that intermetallic compounds of Mg_2Al_3 and Mg_5Al_8 formed from the main components of the alloy have the greatest influence on the corrosion properties of materials. The examples show that considering even high purity aluminum as an anisotropic material distorts the assessment of its corrosion properties, all the more important for industrial alloys. Although scientific approaches have long been developed that take into account the influence of the type of structure and intermetallic compounds on the corrosion characteristics of various materials made of aluminum alloys, various regulatory documents and studies of specialists often do not take into account the data of mutual studies, they are disjointed. In particular, this applies to industry standards OST 92-1619-87 and OST 92-1017-79, which is why materials that have not identified signs of burning can get into production under the guise of high-quality ones. As measures to limit the amount of excess phases formed in the material and the associated possible corro-

sion damage, an increase in uniformity and a decrease in the temperature of its deformation are proposed.

EDN: DVXNCD, <https://elibrary/dvxncd>

Keywords: burnout of material, corrosion damage, aluminium alloy, hot-rolled sheets and plates, excess phases, impurities, temperature, corrosion properties

Алюминиевый сплав АМг6, химический состав которого определен ГОСТ 4784–2019 [1], является самым высокопрочным среди классических магналиев и обладает повышенной коррозионной стойкостью [2]. Склонность сплава к расслаивающей коррозии соответствует баллу 3 по ГОСТ 9.904–82 [3], повышаясь до 4–5 баллов при нагартовке материала. Отжиг при температуре 310...335 °С устраняет склонность к коррозионному растрескиванию и снижает склонность к межкристаллитной коррозии после нагрева [2]. Однако следует отметить случаи повышенной коррозионной повреждаемости плит и листов из сплава АМг6, при входном контроле показывающих соответствие заданному химическому составу и механическим свойствам.

Цель работы — определить технологические причины повышенной склонности материала к развитию в нем коррозионных повреждений и найти технологические решения, ограничивающие эту склонность.

Характерная микроструктура боковой поверхности листов из сплава АМг6 толщиной 10 мм с повреждениями, соответствующими наибольшим баллам (9 и 10) по ГОСТ 9.904–82 [3], после нахождения в течение нескольких месяцев в условиях неотапливаемого помещения, показана на рис. 1. Микроструктура листа

после десяти лет нахождения в отапливаемом помещении, приведенная на рис. 2, соответствует наибольшему уровню коррозии С5 по ГОСТ Р 9.407–2015 [4]. Однако авторы работ [5, 6] указывают, что коррозионная стойкость магналиев зависит от содержания в них избыточных фаз больше, чем алюминиевых сплавов других систем [5].

Эти соединения можно условно подразделить на две основные группы. Первые состоят из основных компонентов сплава и его примесей и включают в себя Mg_2Si , $AlFeSi$, $AlFeSiMn$, Fe_2SiAl_8 , $CuMg_4Al_6$, $(CrFe)_4Si_4Al_{13}$, $(FeMn)Al_6$ и др. [7], общее содержание которых в значительной мере зависит от химической чистоты сплава. В состав второй группы входят соединения β -фаза Mg_2Al_3 и β' -фаза Mg_5Al_8 [7], образующиеся из основных составляющих сплава без участия примесей (по другим данным, β -фаза соответствует формуле Mg_3Al_4) [8]. Для учета соединений обеих групп в виде объемной доли избыточных фаз удобно ввести численный показатель V_v , как это сделано в работе [9].

Опираясь на известные работы К.А. Осипова, где он проводит аналогии между плавлением, пластическим деформированием и разрушением металлического материала [10, 11] в плоскостях скольжения, можно предположить образование избыточных фаз не только

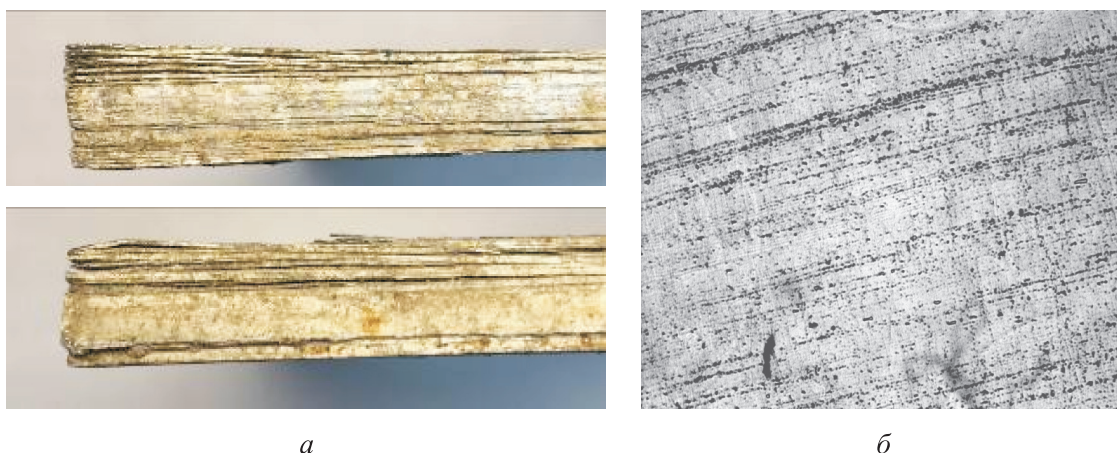


Рис. 1. Микроструктура поврежденной боковой поверхности листов из сплава АМг6 толщиной 10 мм после нахождения в течение нескольких месяцев в неотапливаемом помещении при увеличении $\times 120$:
а — расслаивающая коррозия; б — строчки избыточных фаз в материале до разрушения

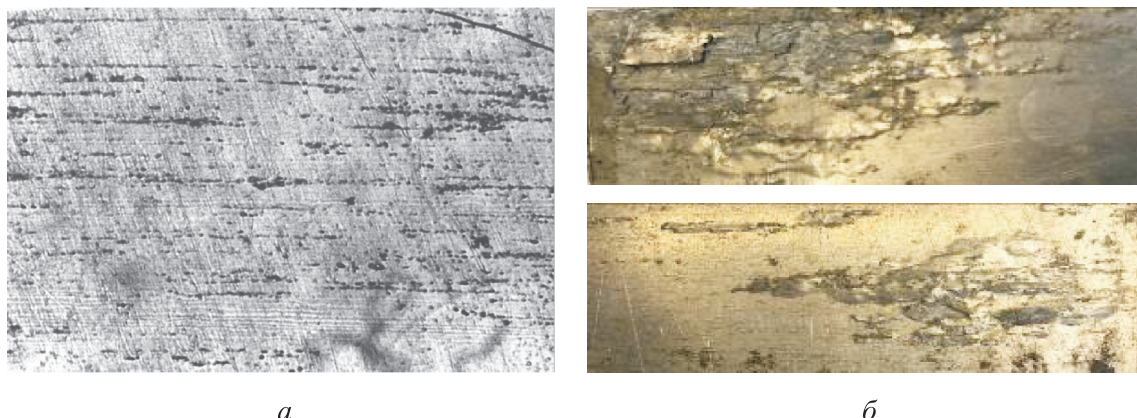


Рис. 2. Микроструктура поврежденной боковой поверхности листов из сплава АМг6 толщиной 10 мм после нахождения в отапливаемом помещении:

а — строчки включений при увеличении $\times 240$;
б — строчечное коррозионное поражение поверхности при увеличении $\times 2$

при неравновесной кристаллизации материала слитка, но и при горячей пластической деформации получаемого материала.

В работах [12, 13] на примерахковки и горячей объемной штамповки деталей из алюминиево-магниевого сплава показано, что этот процесс идет тем быстрее, чем выше температура и неравномерность деформации материала заготовки, и чем большую роль в процессе деформации играет ее межзеренный механизм. При этом форма деталей и вид их деформации не имеют решающего значения [12, 14, 15]. В части коррозионных свойств металлического материала следует обратить внимание на такой параметр образующих его веществ, как электроотрицательность, т. е. способность атомов в молекуле к притяжению свободных электронов [16].

Основные компоненты сплава — алюминий и магний — по системе Полинга и Гайсинского, обладают соответствующим показателем, равным 1,5 и 1,2 безразмерных единиц [16]. Более электроотрицательные относительно твердого раствора [5] интерметаллические соединения образуют с ним эвтектическую систему [7] и анодно-катодные пары так, как это описано Г.В. Акимовым [17]. Мало того, в работе А.Б. Лаптева и В.В. Кравцова [18] соединения Mg_2Al_3 названы анодной фазой, и отмечено их локальное скопление под действием присутствующих в материале растягивающих напряжений. Усиливаясь при неравномерной горячей деформации в соответствии с принципом Ле Шателье [19], эти процессы напрямую влияют на коррозионные свойства получаемого материала.

Применительно к листам и плитам следует рассмотреть процессы прокатки слитков, которые будут влиять на коррозионные свойства получаемого материала, и сравнить их с действующими нормативными документами. Однако отсутствие отраслевых стандартов, определяющих режимы горячей прокатки плит и листов из алюминиевых сплавов, заставляет обратиться к определяющему технологии изготовления поковок и штамповок ОСТ 92-1619-87 [20]. Как показано в публикациях [11, 12, 14, 15], такое решение можно применить, если схема напряженно-деформированного состояния материала заготовок и температура процессов сравнимы.

Следует отметить, что ОСТ 92-1619-87 имеет несостыковку между содержанием п. 4.1 с табл. 3, указывающих «Температурный режим деформации» сплава АМг6 в пределах $430...300\text{ }^{\circ}\text{C}$, и п. 5.14 с таблицей 5, допускающих $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ как «максимально допустимую температуру нагрева» сплава, что отмечено в работе [21].

При этом самые многочисленные в сплаве интерметаллические соединения Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 имеют температуру плавления 450 и $452\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно [5]. Это значит, что с учетом деформационного разогрева температура материала будет достаточной для расплавления соединений Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 , облегчая их скопление в местах растягивающих напряжений. Возможно поэтому, не указывая прямо на такое противоречие, В.С. Синявский с соавторами отмечал, что для достижения необходимой коррозионной стойкости температура горячей пластической деформации сплава АМг6 не должна превышать $380...400\text{ }^{\circ}\text{C}$ [6].

В связи с этим следует обратить внимание и на то, как ОСТ 92-1017-79 [22] определяет термин «пережог» для алюминиевых сплавов. А именно: в пункте (п.) 1 приложения 1 этого документа указано, что «Пережог — это оплавление границ зерен 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, по сути, пережог материала заключается в расплавлении алюминидов магния Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 как имеющих наименьшие температуры плавления из списка присутствующих интерметаллических соединений.

Далее, в п. 2 приложения 1 к ОСТ 92-1017-79 написано, что «Пережог при температуре, даже незначительно превышающей допустимую, не изменяя механических свойств, показатели которых определяются при испытании на растяжение, оказывает отрицательное влияние на сопротивляемость материала различным видам коррозии». Согласно эталонам приложения 1 к ОСТ 92-1017-79, показанная на рис. 1 и 2 микроструктура склонного к расслаивающей коррозии материала листов является качественной и не имеет признаков пережога.

Это значит, что такой материал после входного контроля беспрепятственно попадет в производство, и повышенное содержание в нем избыточных фаз V_v приведет к потере герметичности ответственных деталей с нанесенным на них покрытием в виде химического никеля Н6 по ГОСТ 9.303-84 [23], как это описано в работе [24].

Между тем металлография горячекатаных листов и плит из сплава АМгб показывает существенное колебание показателя V_v не только в пределах их различных партий, но и в высотном направлении одного образца. При сопоставлении микроструктур и коррозионных повреждений материала выявлено, что повышенное значение показателя V_v предопределяет его коррозионную повреждаемость и, наоборот. Как отмечают А.Б. Лаптев и В.В. Кравцов, высоколегированные сплавы системы Al-Mg склонны к расслаивающей коррозии и коррозионному растрескиванию в атмосферном воздухе, содержащем даже следы влаги [18].

Всегда присутствующие в воде радикалы ОН-группы и различные вещества, в том числе Cl с показателями электроотрицательности 3,56

и 3,18 единиц по Финеманну [16], будут вступать в реакцию в первую очередь с веществом избыточных фаз, вызывая образование питтингов, расслаивание и растрескивание материала. В.П. Батраков с соавторами также указывает [25], что скорости растворения матрицы твердого раствора сплава АМгб и β -фазы Mg_2Al_3 в 3%-ном водном растворе NaCl составляют 6 и 240 г/(м²·ч) соответственно, т. е. различаются примерно в 40 раз.

Если не учитывать этот фактор, то при описании диаграммы потенциал материала ϕ — кислотность среды pH обнаруживаются труднообъяснимые противоречия в теоретической и действительной коррозионной стойкости алюминия. Так, В.В. Скорчеллетти предполагает наличие неких факторов, «возможно изменяющих природу пленки» на поверхности образца [26].

Однако взятая из этой же работы и показанная на рис. 3, а анодная поляризационная кривая алюминия в деаэрированном 0,1Н растворе KNO_3 [26] хорошо отражает действие присутствующих в образце избыточных фаз. Ввиду повышенной электроотрицательности они вступают в реакцию с электролитом быстрее основного материала, вследствие чего временно смещают анодную поляризационную кривую влево. Современные исследователи в случае принятия металлических материалов изотропными по химико-физическим свойствам вынужденно идут по тому же пути.

Так, в работе [27] при описании показанной на рис. 3, б анодной кривой О.И. Невский с соавторами делают вывод, что «по-видимому, следует также сделать предположение о том, что разграничение поляризационной кривой на области активного, пассивного и транспассивного (активированного) растворения весьма условны с точки зрения факторов, определяющих характер растворения» и т. д. Между тем, именно в этой работе при исследовании анодного растворения алюминия марки А99 по ГОСТ 11069-2019 [28] приведены весьма интересные данные.

В частности, указано, что «диффузионный импеданс (импеданс Варбурга), отражающий диффузионные ограничения в слое диэлектрика на поверхности электрода» составляет 8135 Ом·см·с^{-1/2} для «исходной воздушно-окисленной оксидной пленки (после механического шлифования)» и 18 150 Ом·см·с^{-1/2} для материала, прошедшего «отжиг исходного воз-

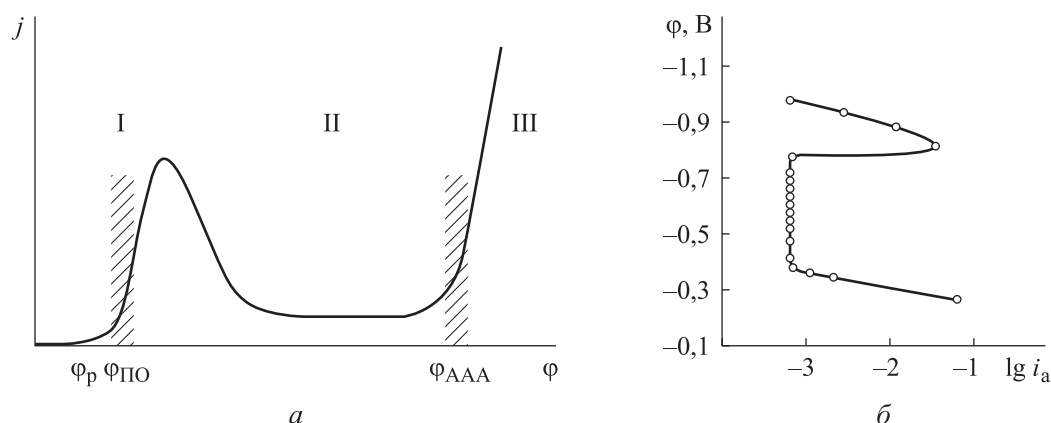


Рис. 3. Анодные поляризационные кривые алюминия в деаэрированном 0,1N растворе соли KNO_3 (а) и общем виде (б):

I — травление, сопровождаемое питтингообразованием; II — пассивное травление (пассивация);
 III — перепассивация (интенсивное растворение);
 ϕ_p — равновесный потенциал; $\phi_{\text{ПО}}$ — потенциал питтингообразования;
 $\phi_{\text{ААА}}$ — анодно-анионной активации

душно-окисленного образца в атмосфере аргона, $T = 575^\circ\text{C}$, $t = 1$ час» [27].

То есть импеданс Варбурга как сопротивление процессу растворения после отжига материала в защитной среде повышается более чем в 2 раза. Эти данные важны тем, что, согласно работе В.В. Захарова, для растворения в алюминии избыточных фаз необходима его гомогенизация при температуре около 500°C [29]. То есть, во-первых, после отжига алюминиевого образца избыточные фазы растворяются в его основе, затрудняя образование питтингов, а во-вторых, даже в особо чистом по примесям материале их достаточно, чтобы существенно влиять на его свойства.

Это еще один пример необходимости учета микрохимической неоднородности алюминиевых материалов при выборе их конструктивного назначения и режимов обработки, без чего экспериментальные данные могут привести исследователей к необоснованным выводам. Как указывает Н.П. Жук [30], учитывающий микрохимическую неоднородность научный подход проработан еще в классических работах Г.В. Акимова и Н.Д. Томашова, став известным под общим названием многоэлектродных систем, и исходящий из того, что «первопричина электрохимической коррозии металлов... — их термодинамическая неустойчивость в данных коррозионных условиях» [30]. Однако в силу некоей научной разобщенности такой подход и сегодня не учтен везде, где бы это требовалось.

Микроструктура типового металлографического шлифа горячекатаного листа толщиной

10 мм из сплава АМг6 и распределение в нем Al, Mg и Fe, полученные методом рентгенофлуоресцентного анализа, приведены на рис. 4, а–г. [31], где светлый тон соответствует большому содержанию вещества и, наоборот. Видно, что в местах нахождения Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 , содержащих 37,3 и 36 % ат. [7], концентрация алюминия падает, а магния — возрастает. Подсчет по методике ГОСТ 21073.4–75 [32] выявил, что показанный на рис. 1 и 2 материал содержит около 4,5 % ат. избыточных фаз, а материал, где показатель V_v составляет 1,5...2,0 % ат., имеет меньшую склонность к коррозионным повреждениям.

Распределения Fe и Mg в сплаве АМг6 напрямую не связаны, так как первые приходят в расплав с шихтой и из материала тигля, а соединения алюминия и магния возникают при кристаллизации и горячей деформации получаемого материала. Рост показателя V_v способствует коррозионной повреждаемости материала, и учет «анодных» фаз объясняет причины повышенной окисляемости алюминия во влажной среде [8], как это описано в работе Г.В. Акимова [17].

В публикациях [5, 33] также отмечено, что равномерное распределение избыточных «анодных» фаз повышает сопротивление материалов системы Al–Mg коррозионным повреждениям, а значит, их коррозионная стойкость должна задаваться равномерной проработкой с преобладанием внутризеренной деформации без перегрева материала выше температуры плавления «анодных» фаз.

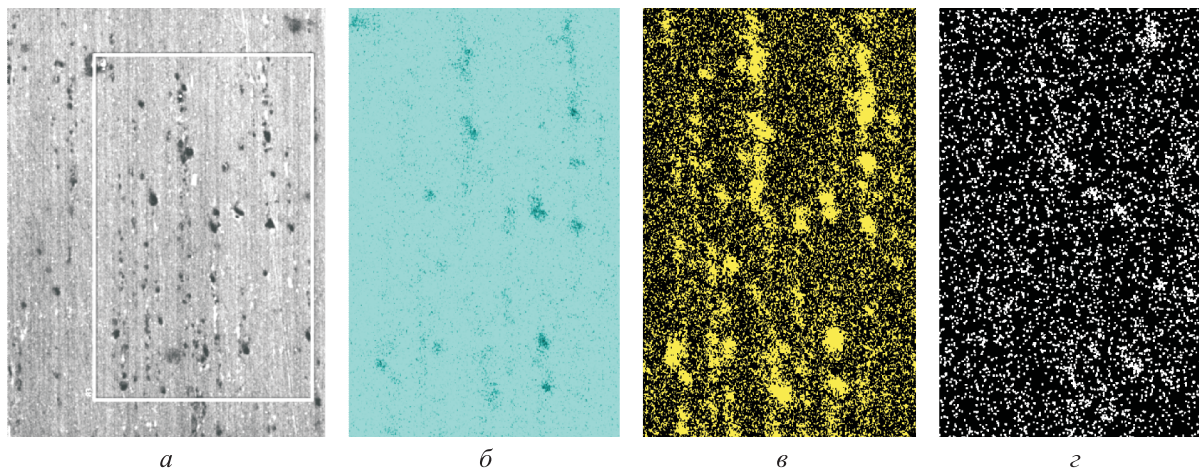


Рис. 4. Микроструктура типового металлографического шлифа горячекатаного листа толщиной 10 мм из сплава АМг6 при увеличении $\times 200$ (а) и распределение в нем Al (б), Mg (в) и Fe (г) при увеличении $\times 250$

Сопоставление результатов математического моделирования со структурой различных кованых и штампованных поковок показало [12, 14, 15], что температуру нагрева заготовок перед деформацией сплава АМг6 следует ограничивать в пределах $380\ldots 400^\circ\text{C}$ и предотвращать пережог их материала, особенно в областях локализованных деформаций, как указано в работах [21, 34].

Выводы

1. Образование избыточных фаз, состоящих из основных компонентов твердого раствора магналиев Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 , происходит тем активнее, чем выше температура и локализация деформационных процессов в металлическом материале.

2. Повышенное содержание избыточных фаз, в том числе образующихся непосредственно из основных компонентов магналиев и напрямую не связанных с химической чистотой материала соединений Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 , ухудшает его коррозионную стойкость.

3. Даже в особо чистых по химическому составу алюминиевых сплавов количество образующихся с участием примесей избыточных фаз является достаточным, чтобы существенно влиять на их коррозионные свойства. Поэтому рассмотрение материалов из алюминиевых сплавов как химически изотропных искажает смысл получаемых данных по их коррозионным свойствам.

4. ОСТ 92-1619-87 содержит противоречия в части допустимых температур нагрева,ковки и штамповки сплавов группы АМг, с учетом деформационного разогрева превышающих температуру плавления алюминидов магния Mg_2Al_3 и Mg_5Al_8 . При проверке по методике ОСТ 92-1017-79 такой материал с не выявленными признаками пережога и пониженными коррозионными свойствами может попасть в производство.

5. В целях повышения сопротивляемости коррозионным процессам и предотвращения пережога сплава АМг6 следует ограничивать температуру нагрева заготовок перед деформацией в пределах $380\ldots 400^\circ\text{C}$.

Литература

- [1] ГОСТ 4784-2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. Москва, Стандартинформ, 2019. 31 с.
- [2] Туманов А.Т., ред. *Авиационные материалы*. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Москва, ОНТИ, 1982. 625 с.
- [3] ГОСТ 9.904-82. Единая система защиты от коррозии и старения. Сплавы алюминиевые. Метод ускоренных испытаний на расслаивающую коррозию. Москва, Изд-во стандартов, 1983. 11 с.
- [4] ГОСТ Р 9.407-2015. Единая система защиты от коррозии и старения. Покртия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. Москва, Стандартинформ, 2014. 43 с.

- [5] Синявский В.С., Вальков В.Д., Калинин В.Д. *Коррозия и защита алюминиевых сплавов*. Москва, Металлургия, 1986. 368 с.
- [6] Синявский В.С., Истомин В.В., Уланова В.В. Исследование термомеханической обработки сплавов системы Al-Mg с целью повышения их коррозионной стойкости. Коррозионностойкие конструкционные сплавы. *Труды ВИАМ*, 1975, № 7, с. 93–103.
- [7] Мондольфо Л.Ф. *Структура и свойства алюминиевых сплавов*. Москва, Металлургия, 1979. 640 с.
- [8] Фридляндер И.Н., ред. *Металловедение алюминия и его сплавов*. Москва, Металлургия, 1983. 279 с.
- [9] Чернявский К.С. *Стереология в металловедении*. Москва, Металлургия, 1977. 279 с.
- [10] Осипов К.А. *Некоторые активируемые процессы в твердых металлах и сплавах*. Москва, Изд-во АН СССР, 1962. 131 с.
- [11] Осипов К.А. *Новые идеи и факты в металловедении*. Москва, Наука, 1986. 70 с.
- [12] Головкин П.А. Управление деформированной структурой алюминиево-магниевых сплавов. *Технология металлов*, 2005, № 11, с. 10–16.
- [13] 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.
- [14] Галкин В.И., Головкин П.А., Фесенко С.А. Совершенствование П-образных поковок из алюминиевых и титановых сплавов на основе критериального подхода. *Технология машиностроения*, 2020, № 7, с. 10–15.
- [15] Галкин В.И., Головкин П.А. Получение качественных переходников топливных систем из алюминиево-магниевых сплавов с использованием одноручьевого штамповки в открытых штампах. *Технология легких сплавов*, 2003, № 2–3, с. 46–51.
- [16] Бацанов С.С. *Электроотрицательность элементов и их химическая связь*. Новосибирск, Изд-вр Сибирского отделения АН СССР, 1962. 196 с.
- [17] Акимов Г.В. *Основы учения о коррозии и защите металлов*. Москва, Металлургиздат, 1946. 463 с.
- [18] Лаптев А.Б., Кравцов В.В. *Коррозия алюминиевых сплавов*. Москва, ВИАМ, 2021. 320 с.
- [19] Сеничева Л.В., Яргаева В.А. *Физическая химия: химическое равновесие*. Хабаровск, Изд-во ТОГУ, 2008. 83 с.
- [20] ОСТ 92-1619–87. *Заготовки штампованные из алюминиевых сплавов. Типовой технологический процесс горячей объемной штамповки*. Москва, ОНТИ, 1987. 44 с.
- [21] Головкин П.А. Контроль на пережог поковок из алюминиевого сплава АМг6. *Технология легких сплавов*, 2023, № 1, с. 90–96, doi: <https://doi.org/10.24412/0321-4664-2023-1-90-96>
- [22] ОСТ 92-1017–79. *Сплавы алюминиевые деформируемые. Методика металлографического контроля на пережог*. Москва, ОНТИ, 1979. 25 с.
- [23] ГОСТ 9.303–84. *Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору*. Москва, Стандартинформ, 2008. 46 с.
- [24] Головкин П.А. Повышение качества корпусов микросборок из сплавов группы АМг управлением количественного содержания в их материале интерметаллических соединений. *Металлообработка*, 2022, № 1, с. 43–50, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2022.1.43>
- [25] Батраков В.П. Проблемы морской коррозии. В: *Коррозия и защита сплавов в морских условиях*. Москва, ВИАМ, 1985, с. 6–22.
- [26] Скорчеллетти В.В. *Теоретические основы коррозии металлов*. Ленинград, Химия, 1973. 263 с.
- [27] Невский О.И., Бурков В.М., Гришина Е.П. и др. *Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов*. Иваново, ИГХТУ, 2006. 282 с.
- [28] ГОСТ 11069–2019. *Алюминий первичный. Марки*. Москва, Стандартинформ, 2019. 11 с.
- [29] Захаров В.В. *Разработка научных основ легирования алюминиевых сплавов, предназначенных для прессования, и термической обработки слитков из них*. Автореф. дисс. ... канд. тех. наук. Москва, ВИЛС, 1988. 46 с.
- [30] Жук Н.П. *Курс коррозии и защиты металлов*. Москва, Металлургия, 1968. 407 с.

- [31] Абрамов А.В., Пупышев А.А. *Рентгенофлуоресцентный анализ*. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2017. 96 с.
- [32] ГОСТ 21073.4–75. *Металлы цветные. Определение величины зерна планометрическим методом*. Москва, Изд-во стандартов, 2002. 24 с.
- [33] Ульянин Е.А., ред. *Структура и коррозия металлов и сплавов*. Москва, Metallurgiya, 1989. 400 с.
- [34] Петров А.П., Головкин П.А. *Перспективные технологии легких и специальных сплавов*. Москва, Физматлит, 2006. 432 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] Tumanov A.T., ed. *Aviatsionnye materialy. T. 4. Alyuminievye i berillievye splavy* [Aviation materials. Vol. 4. Aluminum and beryllium alloys.]. Moscow, ONTI Publ., 1982. 625 p. (In Russ.).
- [3] GOST 9.904–82. *Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Splavy alyuminievye. Metod uskorenykh ispytaniy na rasslaivayushchuyu korroziyu* [Unified system of corrosion and ageing protection. Aluminium alloys. Accelerated test method for exfoliating corrosion]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1983. 11 p. (In Russ.).
- [4] GOST R 9.407–2015. *Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Pokrytiya lakokrasochnye. Metod otsenki vneshnego vida* [Unified system of corrosion and ageing protection. Paint coatings. Method of appearance rating]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 43 p. (In Russ.).
- [5] Sinyavskiy V.S., Valkov V.D., Kalinin V.D. *Korroziya i zashchita alyuminievykh splavov* [Corrosion and protection of aluminum alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 368 p. (In Russ.).
- [6] Sinyavskiy V.S., Istomin V.V., Ulanova V.V. Study of thermomechanical treatment of al-mg alloys to improve their corrosion resistance. corrosion-resistant structural alloys. *Trudy VIAM*, 1975, no. 7, pp. 93–103. (In Russ.).
- [7] Mondolfo L.F. *Aluminum alloys. Structure and properties*. Butterworth, 1976. 971 p. (Russ. ed.: *Struktura i svoystva alyuminievykh splavov*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 640 p.)
- [8] Fridlyander I.N., ed. *Metallovedenie alyuminiya i ego splavov* [Metallurgy of aluminum and its alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 279 p. (In Russ.).
- [9] Chernyavskiy K.S. *Stereologiya v metallovedenii* [Stereology in metallurgy.]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 279 p. (In Russ.).
- [10] Osipov K.A. *Nekotorye aktiviruemye protsessy v tverdykh metallakh i splavakh* [Some activated processes in hard metals and alloys]. Moscow, Izd-vo AN SSSR Publ., 1962. 131 p. (In Russ.).
- [11] Osipov K.A. *Novye idei i fakty v metallovedenii* [New ideas and facts in metal science]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 70 p. (In Russ.).
- [12] Golovkin P.A. Control of the deformed structure of aluminum-magnesium alloys. *Tekhnologiya metallov*, 2005, no. 11, pp. 10–16. (In Russ.).
- [13] 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.).
- [14] Galkin V.I., Golovkin P.A., Fesenko S.A. Improvement of U-shaped forgings from aluminum and titanium alloys based on a criteria approach. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2020, no. 7, pp. 10–15. (In Russ.).
- [15] Galkin V.I., Golovkin P.A. Production of high-quality fuel system adapters from aluminum-magnesium alloys using single-strand open-die forging. *Tekhnologiya legkikh splavov* [Technology of Light Alloys], 2003, no. 2–3, pp. 46–51. (In Russ.).
- [16] Batsanov S.S. *Elektrootritsatelnost elementov i ikh khimicheskaya svyaz* [Electronegativity of elements and their chemical bonding]. Novosibirsk, Izd-vr Sibirskogo otdeleniya AN SSSR Publ., 1962. 196 p. (In Russ.).

- [17] Akimov G.V. *Osnovy ucheniya o korrozii i zashchite metallov* [Fundamentals of the theory of corrosion and protection of metals]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1946. 463 p. (In Russ.).
- [18] Laptev A.B., Kravtsov V.V. *Korroziya alyuminievykh splavov* [Corrosion of aluminum alloys]. Moscow, VIAM Publ., 2021. 320 p. (In Russ.).
- [19] Senicheva L.V., Yargaeva V.A. *Fizicheskaya khimiya: khimicheskoe ravnovesie* [Physical chemistry: chemical equilibrium]. Khabarovsk, Izd-vo TOGU Publ., 2008. 83 p. (In Russ.).
- [20] 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, ONTI Publ., 1987. 44 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] OST 92-1017-79. *Splavy alyuminievykh deformiruemyye. Metodika metallograficheskogo kontrolya na perezhog* [Aluminium wrought alloys. Over burning metallographic examination]. Moscow, ONTI Publ., 1979. 25 p. (In Russ.).
- [23] GOST 9.303-84. *Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Obshchie trebovaniya k vyboru* [Unified system of corrosion and ageing protection. Metallic and non-metallic inorganic coatings. General requirements for selection]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 46 p. (In Russ.).
- [24] Golovkin P.A. Improving the quality of amg-group mikroborods by controlling the quantitative containment of intermetallic connections in their material. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2022, no. 1, pp. 43–50, doi: <https://doi.org/10.25960/mo.2022.1.43> (in Russ.).
- [25] 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.).
- [26] Skorшеллетти V.V. *Teoreticheskie osnovy korrozii metallov* [Theoretical foundations of metal corrosion]. Leningrad, Khimiya Publ., 1973. 263 p. (In Russ.).
- [27] Nevskiy O.I., Burkov V.M., Grishina E.P. et al. *Elektrokhimicheskaya razmernaya obrabotka metallov i splavov* [Electrochemical dimensional machining of metals and alloys]. Ivanovo, IGKhTU Publ., 2006. 282 p. (In Russ.).
- [28] GOST 11069-2019. *Alyuminiy pervichnyy. Marki* [Primary aluminium. Grades]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 11 p. (In Russ.).
- [29] Zakharov V.V. *Razrabotka nauchnykh osnov legirovaniya alyuminievykh splavov, prednaznachennykh dlya pressovaniya, i termicheskoy obrabotki slitkov iz nikh*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development of scientific foundations for alloying aluminum alloys intended for pressing and heat treatment of ingots therefrom. Abs. kand. Tech. sci. diss.]. Moscow, VILS Publ., 1988. 46 p. (In Russ.).
- [30] Zhuk N.P. *Kurs korrozii i zashchity metallov* [Course in corrosion and protection of metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 407 p. (In Russ.).
- [31] Abramov A.V., Pupyshev A.A. *Rentgeno fluoressentnyy analiz* [X-ray fluorescence analysis]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2017. 96 p. (In Russ.).
- [32] 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.).
- [33] Ulyanin E.A., ed. *Struktura i korroziya metallov i splavov* [Structure and corrosion of metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 400 p. (In Russ.).
- [34] Petrov A.P., Golovkin P.A. *Perspektivnye tekhnologii legkikh i spetsialnykh splavov* [Promising technologies of light and special alloys]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 432 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 17.12.2025

Информация об авторе

ГОЛОВКИН Павел Александрович — кандидат технических наук, старший инженер-технолог. АО «Долгопрудненское конструкторское бюро автоматики» (141700, Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация, ул. Летная, д. 1, e-mail: pavelgolovkin527@gmail.com).

Information about the author

GOLOVKIN Pavel Aleksandrovich — Candidate of Science (Eng.), Senior Manufacturing Engineer. Dolgoprudnensky Design Bureau of Automation (141700, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation, Letnaya St., Bldg. 1, e-mail: pavelgolovkin527@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Головкин П.А. Некоторые причины повышенной коррозионной повреждаемости листов и плит из сплава АМГб. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 6, с. 60–69.

Please cite this article in English as:

Golovkin P.A. Some causes of increased corrosion damage of Al-6%Mg alloy sheets and plates. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 6, pp. 60–69.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям материалы Всероссийской студенческой конференции, посвященной 65-летию полета Ю. А. Гагарина в космос «Студенческая научная весна»

В настоящем сборнике представлены тезисы докладов, подготовленных по итогам Всероссийской студенческой конференции «Студенческая научная весна», приуроченной к 65-летию первого пилотируемого космического полета Ю.А. Гагарина.

Структура сборника отражает широкий спектр актуальных направлений исследований. В частности, рассматриваются вопросы, касающиеся ракетно-космической и авиационной техники, а также энергетических установок. Отдельное внимание уделено перспективным материалам и производственным технологиям. Значительный блок работ посвящен информационно-коммуникационным технологиям, робототехнике и проблемам управления в технических системах. Кроме того, в издании представлены исследования в области экономики и управления, фундаментальных наук, а также актуальные вопросы современного приборостроения и наук о жизни.

Издание адресовано широкой научной аудитории, включая студентов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений, специализирующихся на технических и естественно-научных дисциплинах.

Тексты докладов размещены в Научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>