

УДК 669.018.29

К.А. Удод¹, Н.Н. Трофименко¹, Д.Н. Романенко¹, Г.С. Севальнев¹**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ АЛЮМИНИЕМ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-3-9-13

Рассмотрены перспективы разработки новых конструкционных сталей с повышенным содержанием алюминия. Показано, что исследования в данной области ведутся как в России, так и за рубежом. Установлено, что основным направлением исследований и разработки является повышение технологичности алюминийсодержащих сталей ввиду их склонности к образованию хрупких интерметаллидов. Проведенный анализ развития сталей с высоким содержанием алюминия вселяет уверенность, что такие материалы могут найти применение в авиастроении.

Ключевые слова: алюминий, стали с алюминием, легирование алюминием, высокая удельная прочность, коррозионная стойкость, прочность, демпфирующая сталь.

К.А. Udod¹, N.N. Trofimenko¹, D.N. Romanenko¹, G.S. Sevalnev¹**PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIONAL ALUMINIUM-DOPED STEELS**

The prospects for the development of new structural steels with increased aluminum content are considered. It is shown that research in this area is carried out both in Russia and abroad. It is determined that the main research and development line is to improve the processability of aluminum-containing steels due to their tendency to form brittle intermetallic compounds. The analysis of the development of steels with high aluminum content gives confidence that such materials can be successfully applied in the aircraft industry.

Keywords: aluminum, steel with aluminum, alloying with aluminum, high specific strength, corrosion resistance, strength, damping steel.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Насущной задачей в авиационной промышленности в настоящее время является снижение массы деталей не только без уменьшения прочности, но и с возможностью ее увеличения [1, 2]. Одним из широко применяемых способов является замена конструкционных сталей на материалы с меньшей плотностью и удовлетворительными механическими характеристиками, такими как магниевые, титановые и алюминиевые сплавы [3–7]. Ведутся также исследования нового типа сплавов с высокой энтропией смешения, где в качестве матрицы используются эквивалентные многокомпонентные системы на основе Al, Be, Li, Mg, Sc, Si, Sn, Ti и Zn. Высокоэнтропийные сплавы – это новый класс сплавов, характеризующийся не добавлением небольшой доли различных металлов к одному базовому, а смешиванием металлов в разных пропорциях. Проблемой, мешающей коммерческому применению высокоэнтропийных сплавов, является сложность в компоновке и структуре упаковки составляющих атомов. Не понятна до конца также сфера приме-

нимости таких материалов. В настоящее время сплавы и технологии их получения находятся на стадии разработки и могут быть применены только в малотоннажном производстве.

В качестве перспективы рассматривается также разработка ферритных сталей повышенной стойкости, легированных алюминием. Осуществление дополнительного легирования с применением специальных технологических приемов может обеспечить необходимые механические свойства, а именно – высокую удельную прочность [8].

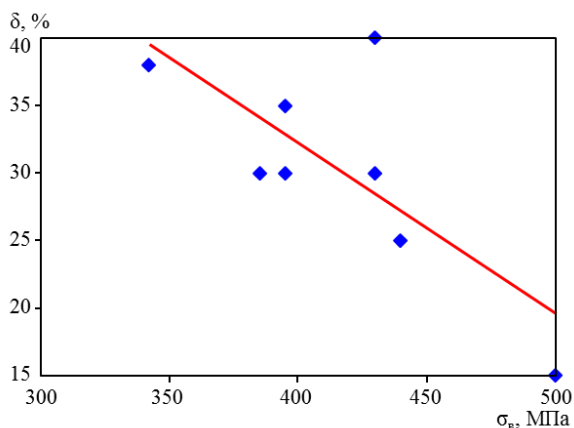
Материалы и методы

Использование алюминия в качестве легирующего компонента позволяет достигать высокой коррозионной стойкости. Кроме того, данный подход позволяет повысить сопротивление окислению в условиях агрессивной газовой среды и повышенных температур. При этом наибольший эффект возникает при дополнительном легировании хромом, а также никелем и кремнием [9]. Но необходимо отметить, что вследствие способности

алюминия образовывать нитриды и интерметаллиды, тем самым приводя к охрупчиванию стали, применение сплавов системы Fe–Al имеет ограничения.

Алюминий обладает меньшей плотностью и большим размером атомов, чем атомы железа. Соответственно применение алюминия в качестве легирующего компонента приводит не только к снижению плотности стали, но и к повышению удельной прочности – отношения значения предела прочности при растяжении к плотности [10, 11].

Механические характеристики и свариваемость сталей, легированных алюминием, недостаточно изучены, потому что они никогда не рассматривались в качестве конструкционных, в отличие от высокомарганцевых сталей, также легированных алюминием. На рисунке приведена корреляционная зависимость между пределом прочности (σ_B) и относительным удлинением (δ) сплавов железа с 3,4–6% (по массе) Al со структурой α -твердого раствора после различных термообработок, построенная по данным работы [12].



Корреляционная зависимость между пределом прочности и относительным удлинением сплавов системы Fe–Al со структурой α -твердого раствора после различных термообработок

Результаты и обсуждение

Значения предела прочности растут в интервале от 350 до 500 МПа, при этом происходит падение значений относительного удлинения – с 35 до 15% соответственно. Все точки, кроме одной, с максимальным удлинением 40% (сплав 02Ю5Т, лист толщиной 3 мм, охлаждение на воздухе) хорошо коррелируют с линейной зависимостью, из которой следует, что возможности упрочнения сплавов системы Fe–Al с однофазной структурой α -твердого раствора (ферритных алюминиевых сталей) ограничены, по крайней мере, при отсутствии дополнительного легирования. Увеличение прочности связано со снижением пластических характеристик.

Стали с содержанием алюминия более 9–10% (по массе) имеют в своей структуре интерметаллиды Fe_3Al и даже $FeAl$. Они используются как материалы или покрытия, стойкие к окислению при температурах до 500–600°C и сохраняющие высокую прочность при этих температурах. Однако они недостаточно пластичны при комнатной температуре, поэтому их использование в качестве конструкционных при комнатной или пониженных температурах без дополнительных технологических приемов, направленных на повышение пластичности, невозможно.

Согласно диаграмме равновесия Fe–Al двухфазная структура α -(FeAl)– Fe_3Al появляется при содержании алюминия ~19% (атомн.) или 10% (по массе) [13]. В работе [14] показано, что интерметаллид Fe_3Al в определенных условиях является достаточно пластичным – удлинение при комнатной температуре в вакууме составляет ~12%, но падает до 2–4% в присутствии паров воды, которая, соединяясь с алюминием, образует оксид Al_2O_3 и ионы водорода, которые, в свою очередь, и приводят к водородному охрупчиванию. На влияние влажности среды, приводящее к снижению пластичности алюминидов железа, указывается также в работе [15].

Имеющиеся в научно-технической литературе данные о сплавах железа с алюминием сводятся к следующему. Сплавы системы Fe–Al с концентрацией алюминия до ~8% (по массе) имеют структуру α -твердого раствора с объемноцентрированной кубической решеткой. По сравнению с γ -твердыми растворами с гранцентрированной кубической решеткой α -твердые растворы менее пластичны и склонны к хладноломкости. Однофазная структура таких сплавов делает невозможным их упрочнение путем фазовых превращений.

В работе [16] показана возможность получения ферритных сталей с содержанием хрома и алюминия на уровне 5% (по массе) каждого. Отличительной особенностью стали, состав которой приведен в этой работе, является структурное состояние и механизм упрочнения. Структурное состояние всех разработанных составов характеризуется наличием крупных (до 1 мм) ферритных зерен, деформированных в направлении прокатки [16]. При небольших увеличениях структура всех исследованных составов одинакова, однако прочностные показатели различны. Более того, на образцах сталей с содержанием алюминия ~8% (по массе) получены неудовлетворительные показатели относительного удлинения – около 2–3%. Причины этого не исследовались, но можно предположить, что всему виной хрупкие интерметаллиды.

При более глубоком исследовании оказалось, что упрочнение этих сталей достигается формированием субзеренной структуры (или субструктуры) за счет снижения температуры при окончании прокатки [17]. Отмечено также, что применение отпуска при температуре 600°C приводит к повышению

прочности и пластичности сталей разработанных составов по механизму дисперсионного твердения за счет выделения наночастиц карбида ванадия. Вышеуказанные причины свидетельствуют о том, что для сталей, обладающих ферритной структурой, существует потенциал упрочнения по различным механизмам.

Отличительной особенностью этой стали – наряду с прочностью 60 МПа и низкой плотностью $\sim 7100 \text{ кг/м}^3$ – является коррозионная стойкость на уровне хромоникелевой нержавеющей стали X18N10T. Это объясняется способностью алюминия наряду с хромом образовывать на поверхности пассивные пленки. Однако этот механизм недостаточно изучен и требует дальнейших исследований. Более того, совместное легирование хромом и алюминием позволяет получить низкоуглеродистые коррозионностойкие стали с уникальными демпфирующими свойствами, применение которых позволяет гасить шум и вибрации.

Согласно статистическим данным, значительная часть аварий и поломок на объектах машиностроения связана с резонансными колебаниями. Зачастую единственным решением данной проблемы (паразитные шумы и вибрации) для конструкций и деталей является применение сплавов с высокими демпфирующими свойствами – в данном случае демпфирующих сталей.

Первые попытки создать конструкционные демпфирующие стали предпринимались во многих странах. Интенсивнее всего работы в данном направлении велись в Японии. Параллельно первые разработки начались в СССР в 1989 г., и уже в 1993 г. на Златоустовском металлургическом заводе была получена первая опытно-промышленная плавка демпфирующей стали марки 01Ю5Т. Основная особенность данной стали – способность поглощать до 50% упругой энергии, подведенной за один цикл. Для сравнения – у обычной конструкционной стали этот показатель равен $\sim 1\%$.

Максимальные показатели демпфирования в стали с 11% (по массе) Сг соответствуют содержанию 0,5–4% (по массе) Al и зависят от параметров термообработки [18]. В частности, после отжига при 850°C наблюдается максимум значений логарифмического декремента затухания колебаний для стали 04X11Ю, который составляет $\delta_m=16\%$, что значительно выше, чем для стали типа X13 ($\delta_m \leq 5\%$). Сталь с добавлением 0,5–4% (по массе) Al обладает высокой ударной вязкостью и удовлетворительной прочностью. Для достижения высокого демпфирования и хорошей эффективности обработки (особенно при горячей штамповке) сталь типа 04X11 должна быть легирована 0,5–3% (по массе) Al. Демпфирующие механизмы для стали системы Сг–Al имеют магнитомеханическую природу. В связи с этим при конструировании изделий из этой стали необходимо учитывать их напряженное состояние и влияние магнитного поля на демпфирование.

Известно, что применение демпфирующих сплавов является эффективным средством улучшения акустических и вибрационных характеристик промышленной продукции [19]. С середины 1950-х гг. исследователи приложили немало усилий для изучения демпфирующих характеристик конструкционных материалов и особенностей механизмов, ответственных за внутреннее трение в них. Решение практических задач требует использования разных высокопоглощающих сплавов, характеризующихся различными амплитудными зависимостями демпфирующей способности, уровнями механических свойств и коррозионной стойкости, а также различными механизмами внутреннего трения.

Анализ также показал, что стоимость изготовления демпфирующих сплавов должна быть низкой, если такие материалы найдут широкое применение в промышленности.

В работе [19] показано, что высокопоглощающие сплавы и стали на основе системы Fe–Al могут изготавливаться в промышленных масштабах на металлургических заводах Российской Федерации. Уровень свойств полученных промышленных сплавов сопоставим с уровнем свойств, достигнутым для высокочистых демпфирующих сплавов системы Fe–Al, полученных в лабораторных условиях.

Стали на основе системы Fe–Al с высоким уровнем демпфирования выгодно отличаются низкой себестоимостью, что связано как с отсутствием дорогих компонентов, так и с тем, что они могут быть изготовлены на высокопроизводительном оборудовании, уже используемом в современной металлургической промышленности. Если такие стали производятся в достаточном больших объемах, их стоимость становится сопоставимой со стоимостью производства легированных конструкционных сталей.

Высокая демпфирующая способность сплавов на основе системы Fe–Al при внешнем переменном нагружении в низкоамплитудном диапазоне позволяет использовать эти сплавы для решения широкого круга проблем, связанных со снижением шума и вибрации промышленных изделий.

В работе [20] показано, что, помимо высокого уровня механических свойств, которые характерны для конструкционных сталей, новые демпфирующие стали отличаются чрезвычайно высоким внутренним рассеянием энергии упругих колебаний: максимум значения логарифмического декремента затухания колебаний достигает 30–40%, т. е. материал поглощает до 40–50% упругой энергии за цикл колебаний.

Такие высокие демпфирующие характеристики в сочетании с высокой пластичностью и удовлетворительными механическими свойствами позволяют эффективно применять новые стали в промышленности. Отечественные металлургические заводы могут выпускать сталь марки 01Ю5Т

в виде листового проката в промышленных объемах. Сталь может поставляться в состоянии высокогемпфирования – после проведения специальной термической обработки на предприятии. Благодаря пластичности этих сталей (относительное удлинение достигает 25–35%) становится возможным проведение холодной штамповки.

В 2018 г. в Пхоханском университете науки и технологий (Южная Корея) создан новый сплав на основе железа и алюминия, масса и прочность которого сопоставимы с титаном при десятикратной разнице в стоимости изготовления в пользу первого. Такие результаты получены впервые.

Для повышения прочностных характеристик ученые использовали никель, который, вступая в реакцию с алюминием, образует В2-кристаллы, обладающие крайне высокой устойчивостью к поперечным нагрузкам.

В результате в отличие от традиционных материалов, которые разрушаются под действиями поперечных сил, новый сплав обладает повышенной устойчивостью к появлению микроразрушений. Прочности В2-кристаллов достаточно, чтобы по ряду характеристик новый сплав был сопоставим с титаном. Получаемый сплав железа с алюминием обеспечивает также сопоставимую с титаном плотность. В настоящее время сплав не производится в промышленных масштабах. Осуществляется разработка и поиск интеграторов технологий.

В целом развитие сталей с высоким содержанием алюминия в настоящее время происходит по трем направлениям:

- повышение демпфирующих характеристик стали;
- снижение плотности стали при сохранении прочностных характеристик – повышение удельной прочности;
- снижение стоимости коррозионностойких сталей путем частичной замены дорогостоящего хрома алюминием.

Весьма перспективным представляется в поисковых работах объединить вышеуказанные направления с целью получения сплавов на основе железа, отличающихся прочностью и плотностью титановых и магниевых сплавов. Применение указанных материалов будет экономически более выгодным по понятным причинам. Как уже упоминалось ранее, стали с повышенным содер-

жанием алюминия, дополнительно легированные хромом, обладают коррозионной стойкостью на уровне нержавеющей сталей. Дальнейшее повышение коррозионной стойкости видится перспективным направлением для исследований и разработок.

Такие материалы найдут широкое применение в машиностроении и во многих отраслях промышленности, в том числе в авиационной. Снижение стоимости производства элементов авиационной техники отечественного производства, таких как силовые элементы конструкции, элементы обшивки, корпуса редукторов, позволит сделать ее более конкурентоспособной.

Заключения

Результаты анализа имеющейся в открытом доступе научно-технической литературы и научных работ, посвященных сталям с повышенным содержанием алюминия, свидетельствуют о перспективности данного направления. Подавляющее большинство работ по разработке таких сталей проводилось и проводятся за рубежом (Германия, Япония, Южная Корея, Китай и др.). Следует отметить, что в этих работах практически отсутствует описание применения разрабатываемых сталей с повышенным содержанием алюминия. По крайней мере не удалось найти никаких сведений о применении сталей с высокой удельной прочностью в авиации за рубежом. Проведенный анализ развития сталей с высоким содержанием алюминия вселяет уверенность, что такие материалы могут найти успешное применение в авиастроении.

При успешном промышленном освоении сталей с повышенным содержанием алюминия на крупных металлургических предприятиях Российской Федерации – ПАО «Северсталь», АО «НЛМК», АО «ММК» и др. – станет возможным использовать данные стали не только для авиастроения, но и, например, в строительстве, судостроении и автомобилестроении.

Как уже отмечалось, замена части дорогостоящих материалов на основе титана более дешевыми стальными аналогами позволит отечественным авиационным предприятиям занять более выгодные позиции на рынке авиационных деталей для гражданской авиации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов В.В., Чесноков Д.В., Козлов И.А., Волков И.А., Петрова А.П. Подготовка поверхности алюминиевого сплава В-1469 перед применением в составе слоистого гибридного материала // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №4 (64). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 14–25. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-2-14-25.
3. Вахромов Р.О., Ткаченко Е.А., Попова О.И., Милевская Т.В. Обобщение опыта применения и оптимизация технологии изготовления полуфабрикатов из высокопрочного алюминиевого сплава 1933 для силовых

- конструкций современной авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №2. С. 34–39. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-34-39.
4. Каблов Е.Н., Лукин В.И., Оспенникова О.Г. Перспективные алюминиевые сплавы и технологии их соединения для изделий авиакосмической техники // Тез. докл. 2-ой Междунар. конф. «Алюминий-21. Сварка и пайка». СПб., 2012. Ст. 8.
 5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Стратегические направления развития конструкционных материалов и технологий их переработки для авиационных двигателей настоящего и будущего // *Автоматическая сварка*. 2013. №10. С. 23–32.
 6. Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо-альфа-титанового сплава ВТ41 // *Титан*. 2016. №2 (52). С. 33–42.
 7. Каблов Е.Н., Лукина Е.А., Сбитнева С.В., Хохлатова Л.Б., Зайцев Д.В. Формирование метастабильных фаз при распаде твердого раствора в процессе искусственного старения Al-сплавов // *Технология легких сплавов*. 2016. №3. С. 7–17.
 8. Панарин А.В., Ильин В.А. Алюминирование конструкционных сталей методом термического разложения металлоорганической жидкости // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №1. С. 20–24. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-20-24.
 9. Улиг Г.Г., Ревя П.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Л.: Химия, 1989. 456 с.
 10. Удельный вес стали // *Промышленный портал [Электронный ресурс]*. URL: <http://промпортал.ru/stal13> (дата обращения: 11.03.2019).
 11. Frommeyer G., Bruh U. Microstructures and Mechanical Properties of High-Strength Fe–Mn–Al–C Light-Weight TRIPLEX Steels // *Steel Research International*. 2006. Vol. 77. P. 627–633.
 12. Чудаков И.Б. Структурные механизмы формирования высокодемпфирующего состояния в ферромагнитных сплавах на основе α -Fe: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, 1994. 194 с.
 13. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. Т. 1. 996 с.
 14. Liu C.T., Lee E.H., McKamey C.G. An environmental effect as the major cause for room-temperature embrittlement of iron-aluminum // *Scripta Metallurgica*. 1989. Vol. 23. P. 875–880.
 15. Garcia-Alonso M.C., Lopez M.F., Escudero M.L. et al. Corrosion behaviour of an Fe₃Al-type intermetallic in a chloride containing solution // *Intermetallics*. 1999. No. 7. P. 185–191.
 16. Удод К.А. Управление структурой коррозионноустойчивых сталей мартенситного, мартенситно-аустенитного и ферритного классов для повышения механических свойств и коррозионной стойкости: дис. ... канд. техн. наук. М.: ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, 2016. 161 с.
 17. Родионова И.Г., Стукалин С.В., Бакланова О.Н., Удод К.А. и др. Влияние легирования алюминием и деформационно-термической обработки на кристаллическое строение проката // *Металлург*. 2016. №8. С. 67–71.
 18. Skvortsov A.I., Kondratov V.M. High-damping Cr–Al steel // *Metal Science and Heat Treatment*. 1991. Vol. 33. Issue 11. P. 876–878.
 19. Chudakov I.B., Aleksandrova N.M., Makushev S.Yu. High-damping alloys and steels based on Fe–Al: structure, properties, and application features // *Metal Science and Heat Treatment*. 2012. Vol. 54. Issue 5–6. P. 239–243.
 20. Chudakov I.B., Aleksandrova N.M., Makushev S.Yu. Peculiar features of the structure and operational properties of new economical, high-damping steels // *Steel*. 2007. Vol. 37. Issue 1. P. 73–78.