

УДК 539.42:539.43

В.В. Коновалов¹, С.В. Дубинский¹, А.Д. Макаров¹, А.М. Доценко¹

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46

Исследуется корреляция между механическими свойствами авиационных материалов. Представлены экспериментальные данные прочностных характеристик полуфабрикатов из следующих сплавов: В93, В95 (7075), Д16, 1163 (2024), 30ХГСА, АК4-Т2. Проведен анализ соотношений между пределами прочности и выносливости, условным пределом текучести, относительным удлинением и относительной пластичностью материалов, получаемых в процессе серийного производства. Исследования показали слабую корреляцию за исключением трех пар. Полученные результаты открывают возможность совершенствования авиационных сплавов путем одновременного повышения нескольких несвязанных между собой механических свойств материалов.

Ключевые слова: металлические сплавы, предельная прочность, предельная выносливость, условный предел текучести, корреляция, статистический анализ.

V.V. Konovalov¹, S.V. Dubinskiy¹, A.D. Makarov¹, A.M. Dotsenko¹

RESEARCH OF CORRELATION DEPENDENCIES BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES OF AVIATION MATERIALS

The correlation between structural properties of alloys V93, V95 (7075), D16, 1163 (2024), 30HGSA, AK4-T2 has been studied. The ratio analysis between ultimate stress, endurance limit, yield stress, relative elongation and relative plasticity of materials made in batch production has been determined. It is shown that correlation is very weak excepting three pairs. The obtained results give the possibility for improvement of aviation alloys by simultaneously increasing mechanical properties of materials.

Keywords: metal alloy, ultimate stress, endurance limit, yield stress, correlation, statistical analysis.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: info@tsagi.ru

Введение

Одной из важных задач, решаемых при разработке новых образцов авиационной техники, является повышение характеристик материалов, используемых для изготовления элементов планера и шасси. Такие металлические сплавы, как В93, В95 (7075), 1163 (2024), 30ХГСА, широко применялись ранее и продолжают успешно применяться в конструкциях современных образцов авиационной техники: стойках шасси, силовом наборе, панелях крыла и фюзеляжа самолетов SSJ-100, Ил-112В, МС-21, Boeing 767-300, Boeing 777. Одновременно с этим указанные материалы продолжают совершенствоваться. Новейшие достижения в области материаловедения и развития технологий металлургии позволяют существенно улучшить металлические сплавы по целому ряду характеристик, включая предельные прочность и выносливость, условный предел текучести и т. д. Установление корреляции между этими характеристиками, определяющими различные аспекты эксплуатации изделий и конструкций, важно как с практической, так и с научной точки зрения.

Во-первых, такая корреляция позволила бы быстро оценивать одни характеристики, зная другие, а, во-вторых, это дало бы возможность исследовать общие факторы влияния, обусловленные состоянием особенностей микроструктуры материала.

Данная работа посвящена поиску корреляции между служебными свойствами авиационных материалов. В ней обобщены данные, полученные на ранних этапах внедрения исследуемых материалов и полуфабрикатов, и современные сведения, полученные в рамках реализации работ, выполненных в последние годы. Приведены данные экспериментальных исследований характеристик различных металлических сплавов.

Исследование корреляционных зависимостей

С целью обнаружения корреляции между механическими свойствами использованы данные экспериментальных исследований полуфабрикатов больших групп алюминиевых и титановых сплавов и сталей [1–8]: В93п.ч.-Т1 (штамповка), В95п.ч.-Т1 (плита), В95п.ч.-Т2 (7075, плита),

Средние значения механических свойств исследованных авиационных материалов

Материал (полуфабрикат)	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_{-1}	$\delta, \%$	$K_{1c}, \sqrt{\text{МПа}}$	Область применения
	МПа					
В93п.ч.-Т1 (штамповка)	505	480	160	6,5	900	Шпангоуты, фитинги, кронштейны, рамы, балки для самолета Ту-160
В95п.ч.-Т1 (плита толщиной 11–40 мм)	552	489	150	12	1360	Верхняя обшивка крыла, фюзеляж, стойки, детали внутреннего набора для самолетов Ил-112В и SSJ-100
В95п.ч.-Т2 (7075, плита толщиной 11–40 мм)	547	489	160	12	1150	
В95п.ч.-Т3 (плита)	515	440	150	11	1270	
В95п.ч.-Т1 (лист толщиной 6–10 мм)	523	454	140	13	1370	Верхняя обшивка для самолета Ту-154
В95-Т1 (лист)	551	–	150	–	–	Верхняя обшивка для самолетов Ту-114, Ту-95, М3, М4
АК4-Т2 (плита)	443	395	160	7	700	Обшивка крыла для самолета Ту-144
1163-Т (2024, лист толщиной до 4 мм)	468	348	160	22	–	Обшивка фюзеляжа, крыло для самолетов Ил-112В, SSJ-100, Boeing, MC-21
1201-Т1 (плита)	470	370	160	10,6	–	Стрингеры силового набора для вертолета Ми-6
30ХГСА	1308	1120	160	14	–	Шасси, узлы крепления для самолетов Ил-112В, SSJ-100, MC-21
Д16ч.-Т (прессованная панель)	470	364	160	19	–	Обшивка нижней панели крыла, киль для самолетов Ил-112В, SSJ-100, Boeing
Д16ч.-Т (плита)	435	–	160	–	–	Нижняя обшивка для самолетов Ил-96 и Ил-86
1163-Т (Д160.ч.-Т, плита толщиной 26–40 мм)	486	374	160	16	<2750	Элементы конструкций, работающие на растяжение, для самолетов Ил-112В, Boeing

В95п.ч.-Т3 (плита), Д16ч.-Т (прессованная панель), 1163-Т (плита), 1163-Т (2024, лист), 30ХГСА, АК4-Т2 (плита) и др. Данные экспериментальных исследований, приведенные в таблице, получены на серийных полуфабрикатах, изготовление которых проводилось в период от одного месяца до двух лет на одном и том же оборудовании. Все выборки не цензурированные, т. е. учтены все результаты испытаний.

Для всех представленных материалов и полуфабрикатов рассмотрены следующие соотношения прочностных характеристик:

– предел прочности σ_B –условный предел текучести $\sigma_{0,2}$;

– предел прочности σ_B –относительное удлинение δ ;

– предел прочности σ_B –критический коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} ;

– относительное удлинение δ – K_{1c} ;

– условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ – K_{1c} ;

– предел выносливости σ_{-1} –предел прочности σ_B ;

– предел выносливости σ_{-1} –условный предел текучести $\sigma_{0,2}$;

– относительная пластичность $(\sigma_B - \sigma_{0,2}) / \sigma_B$ –относительное удлинение δ .

Примеры полученных корреляционных зависимостей и соответствующие коэффициенты корреляции (r^2) приведены на рис. 1–5.

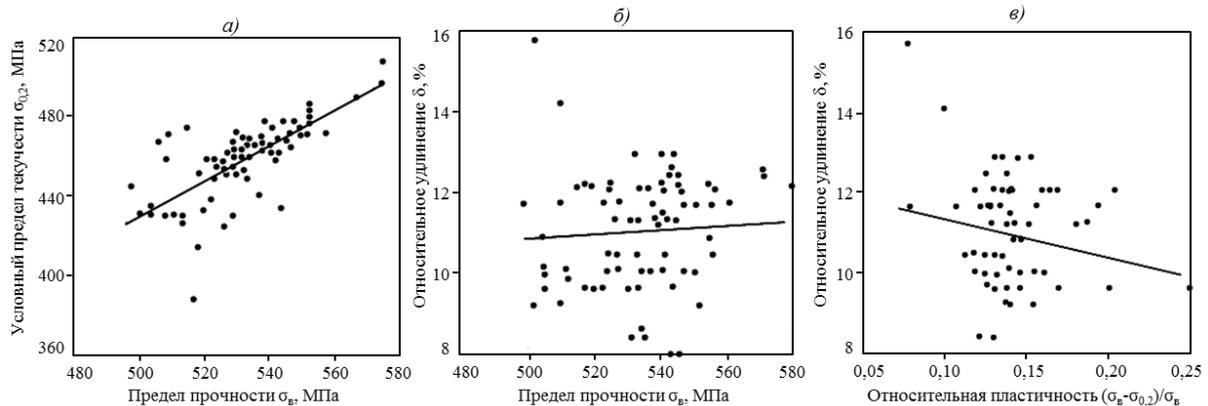


Рис. 1. Соотношения $\sigma_B - \sigma_{0,2}$ (а; коэффициент корреляции $r=0,54$), $\sigma_B - \delta$ (б; $r=0,0038$) и $[(\sigma_B - \sigma_{0,2}) / \sigma_B] - \delta$ (в; $r=0,0035$) для плиты из сплава В95п.ч.-Т2 (7075)

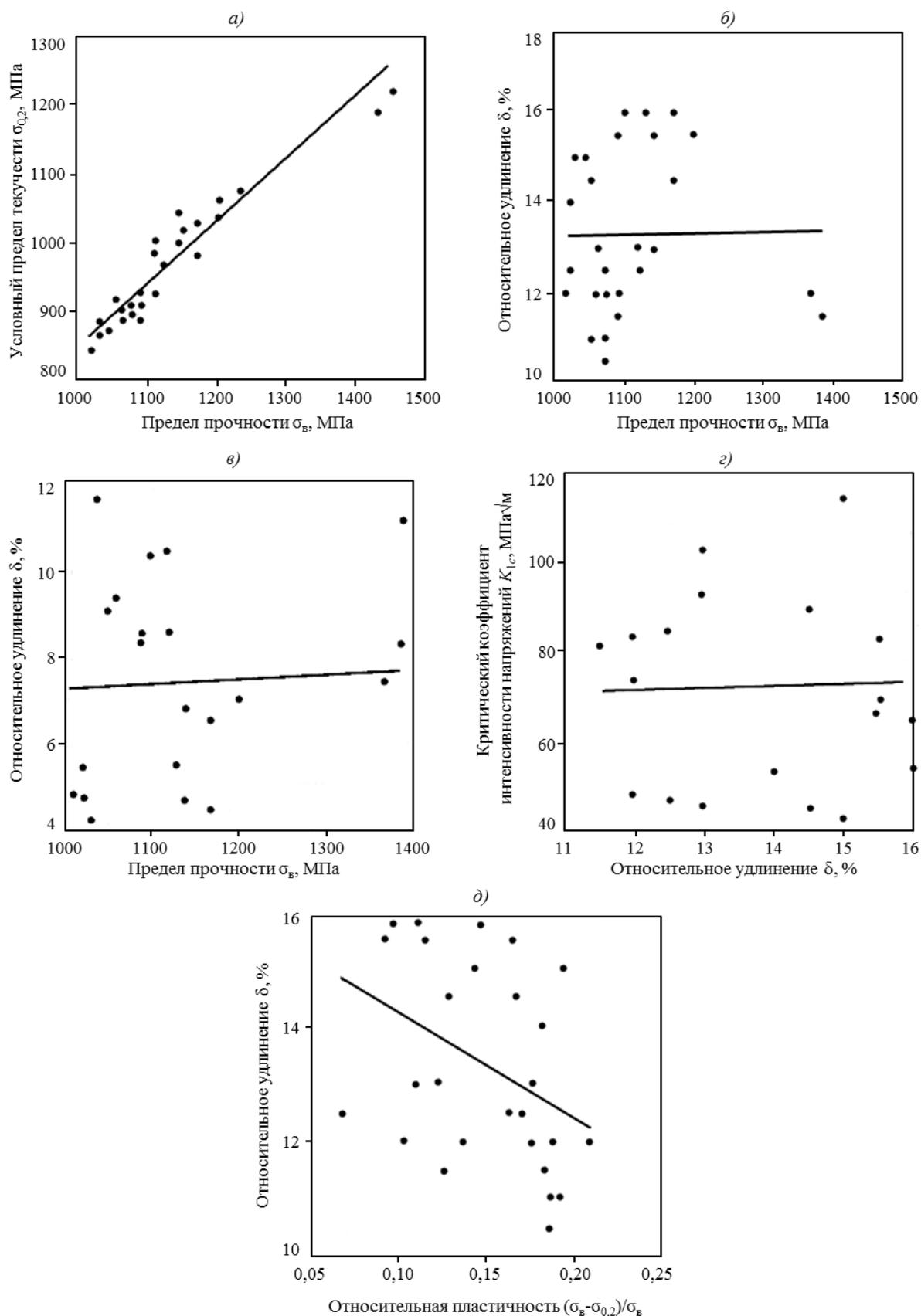


Рис. 2. Соотношения $\sigma_B - \sigma_{0,2}$ (а; коэффициент корреляции $r=0,91$), $\sigma_B - \delta$ (б, в; $r=0,00027$ и $r=0,004$ соответственно), $\delta - K_{Ic}$ (г; $r=0,0003$) и $[(\sigma_B - \sigma_{0,2})/\sigma_B] - \delta$ (д; $r=0,16$) для стали 30ХГСА

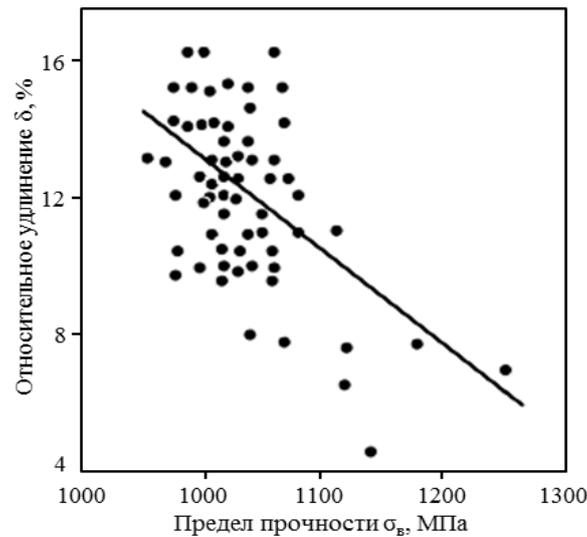


Рис. 3. Соотношение σ_b - δ (коэффициент корреляции $r=0,2879$) для сплава ВТ20

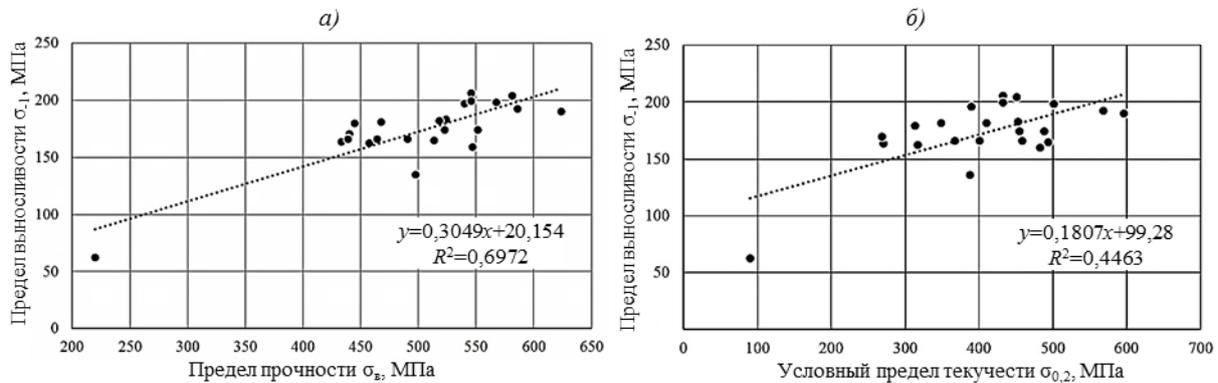


Рис. 4. Зависимости предела выносливости σ_1 на базе 10^5 циклов от предела прочности σ_b (а; коэффициент корреляции $r=0,83$) и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (б; $r=0,68$) для полуфабрикатов из алюминиевых сплавов

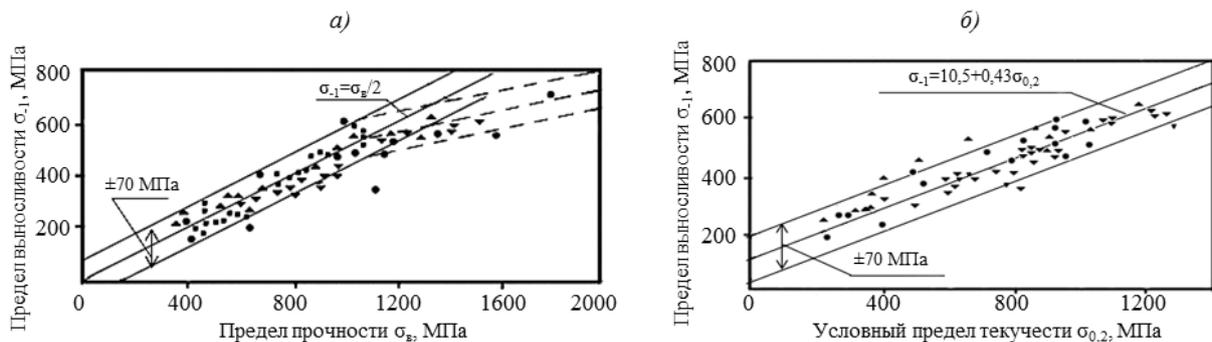


Рис. 5. Соотношения предела выносливости σ_1 от предела прочности σ_b (а) и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (б) для сталей при симметричном цикле нагружения (точками разной формы показаны результаты, полученные разными исследователями [10])

Соотношения «предел выносливости σ_1 –предел прочности σ_b » и «предел выносливости σ_1 –условный предел текучести $\sigma_{0,2}$ » изучали на основе накопленных результатов испытаний на усталость при симметричном цикле нагружения ($R=-1$) для определения предела выносливости σ_1 [9–12].

Зависимости предела ограниченной выносливости на базе 10^5 циклов нагружения (коэффициент асимметрии 0 и 0,1; частота 2–3 Гц) плоских образцов с отверстием, изготовленных из панелей, листов, прессованных профилей, штамповок и отливок из алюминиевых сплавов Д16ч.-АТ, Д16ч.-ТПП, 1163-АТВ, 1163-РДТВ,

1163-ТПП, В95п.ч.-Т2, В95о.ч.-Т2, 1420-Т1, 1933-Т3, АК6-Т1, МЛ5п.ч.-Т4, построенных на основе данных справочника «Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов» [7], представлены на рис. 4.

Установлено, что для сталей средняя величина предела выносливости σ_{-1} гладких образцов составляет 0,5 от предела прочности σ_b , а пределы выносливости всех сталей попадают в полосу разброса $\sigma_{-1}=\pm 70$ МПа, т. е. $\sigma_{-1}=0,5\sigma_b\pm 70$ МПа. Кроме того, наблюдалась тенденция роста значений σ_{-1} при увеличении значений σ_b , т. е. сталь с большим пределом прочности σ_b имеет больший предел выносливости σ_{-1} . Зависимость σ_{-1} от σ_b практически линейная до уровня $\sigma_b\approx 1200$ МПа. При $\sigma_b > 1200$ МПа величина предела выносливости σ_{-1} растет очень слабо и даже возможны случаи ее снижения (рис. 5, а).

Влияние условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ на предел выносливости σ_{-1} имеет такую же тенденцию, как и предел прочности. Зависимость σ_{-1} от $\sigma_{0,2}$ для сталей имеет также линейный характер и может быть аппроксимирована до $\sigma_{0,2}\approx 1200$ МПа уравнением $\sigma_{-1}=10,5+0,43\sigma_{0,2}$ с полосой разброса ± 70 МПа (рис. 5, б).

Для алюминиевых сплавов тенденции зависимости между механическими свойствами качественно аналогичны, но выражаются более слабо, чем у сталей. Например, зависимость предела выносливости σ_{-1} от предела прочности σ_b , в отличие от сталей, имеет нелинейный характер и при изменении σ_b с 250 до 600 МПа предел выносливости на базе 10^7 циклов изменяется со 100–120 только до 150–180 МПа. Следует отметить, что все гладкие образцы для алюминиевых сплавов изготавливались из прессованных и катаных полуфабрикатов и не было ни одного образца из листовых алюминиевых сплавов.

Для гладких образцов относительные величины σ_{-1}/σ_b и $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ до определенных пределов σ_b

либо остаются постоянными – для сталей, либо снижаются – для алюминиевых сплавов.

Для чугунов, литых сталей, магниевых, медных и титановых сплавов наблюдаемая тенденция сохраняется, но со значительным увеличением разброса с ростом σ_b .

Анализ соотношений выявил устойчивую корреляционную зависимость между тремя парами прочностных характеристик: предел прочности–условный предел текучести; предел прочности–предел выносливости; условный предел текучести–предел выносливости. При этом связь между условным пределом текучести и пределом прочности имеет линейную корреляцию. Полученный результат подтверждается современными зарубежными работами по исследованию корреляции между прочностными характеристиками сталей с $\sigma_{0,2}$ – до 2000 МПа и σ_b – до 2400 МПа [13]. На рис. 6 представлено сопоставление полученных данных. Точками черного цвета обозначены результаты зарубежных исследований сталей указанного ранее диапазона характеристик, а синего – результаты данной работы для стали 30ХГСА.

В остальных исследованных в данной работе случаях сколь либо существенных корреляционных зависимостей не наблюдается.

Из этого следует, что возможно совершенствование сплавов при одновременном изменении нескольких значимых и независимых друг от друга характеристик.

Подобный метод исследовался как в зарубежных, так и отечественных работах в отношении металлических сплавов с целью увеличения характеристик трещиностойкости при сохранении и даже некотором увеличении характеристик прочности [14]. Так, на рис. 7 представлена диаграмма соотношений характеристики трещиностойкости (K_{Ic}) и условного предела текучести ($\sigma_{0,2}$) с указанием областей допустимых изменений этих характеристик для различных алюминиевых сплавов.

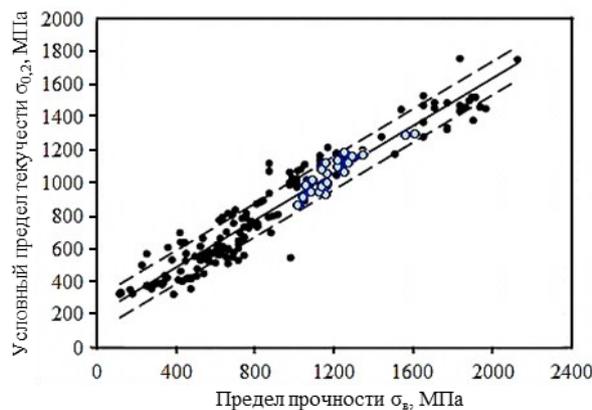


Рис. 6. Соотношение предела прочности σ_b и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ для сталей



Рис. 7. Диаграмма соотношения характеристик прочности алюминиевых сплавов

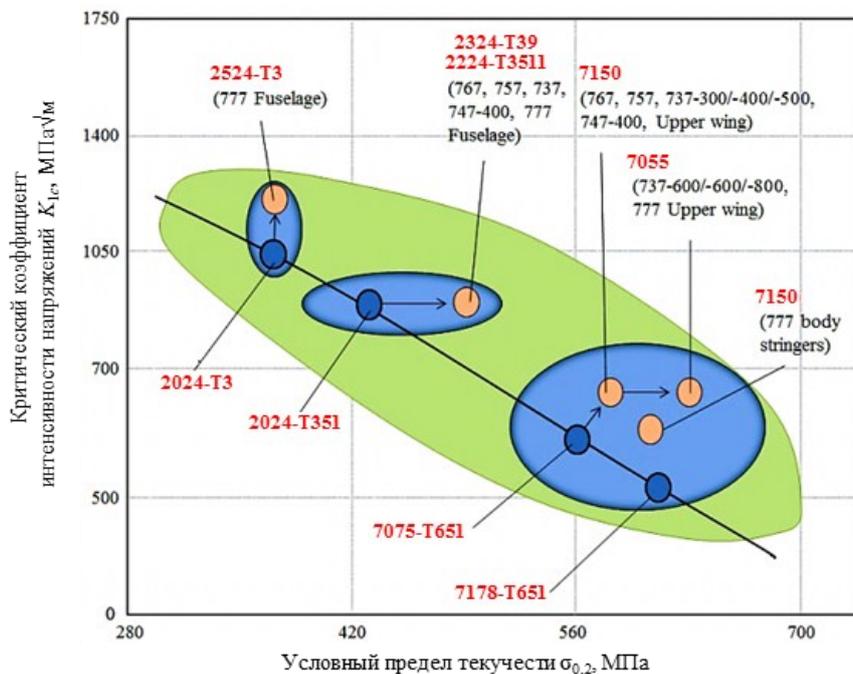


Рис. 8. Тенденция изменения служебных характеристик алюминиевых сплавов, применяемых в самолетах фирмы Boeing

Впоследствии этот метод нашел практическое применение для усовершенствования алюминиевых сплавов, применяемых в самолетах Boeing (рис. 8).

Заключения

В результате проведенных исследований установлено, что в диапазонах изменения прочностных свойств материалов, характерных для условий серийного производства, для всех исследованных в работе металлических сплавов обнаружена корреляционная зависимость между парами: предел прочности–условный предел текучести, предел прочности–предел выносливости, условный предел текучести–предел выносливости. В остальных исследованных в данной работе случаях наблюдаются лишь незначительные тенденции к изменению одних свойств по отношению к другим.

На основании вышеизложенного сделан вывод о возможности совершенствования сплавов при

одновременном изменении нескольких значимых и независимых друг от друга характеристик, т. е. возможно увеличение, например, характеристик трещиностойкости при сохранении и даже некотором увеличении характеристик прочности.

Нахождение и анализ корреляционных зависимостей между прочностными характеристиками авиационных материалов, не представленных в данной работе, являются предметом будущих исследований и будут рассмотрены в последующих работах.

Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при нахождении других связей между параметрами, определяемыми в процессе серийного изготовления продукции, и характеристиками усталости, трещиностойкости, тепловыми характеристиками и другими экспериментальными данными, определяющими зависимость долговечности до образования и длительности роста трещин ряда полуфабрикатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вовнянко А.Г., Бенгус Г.Ю., Воронцов И.С. Статическая прочность и усталостная долговечность крупногабаритных прессованных полуфабрикатов из сплавов Д16ч.-Т, В95п.ч.-Т1 и В95п.ч.-Т2 // Физико-химическая механика материалов. 1982. №1. С. 20–24.
2. Доценко А.М., Поляков А.Н., Мишин В.И., Горячев В.И. Расчетно-экспериментальное исследование влияния технологии на долговечность образца с отверстием и расчетные размеры начальных дефектов // Авиационная промышленность. 1990. №7. С. 75–78.
3. Серебrenникова Н.Ю., Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Иванов А.Л., Попов В.И. Комплекс свойств и структура массивных плит из алюминиевых сплавов В95п.ч.-Т2, АК4-1ч.-Т1 и 1163-Т // Металловедение и современные разработки в области технологии литья, деформации и термической обработки легких сплавов: сб. док. науч.-тех. конф. М., 2016. 10 с.

4. Сенаторова О.Г., Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Иванов А.Л., Попов В.И. Исследование структуры и свойств плиты толщиной 80 мм из сплава В95п.ч.-Т2 // Технология легких сплавов. 2016. №2. С. 37–42.
5. Гриневич А.В., Румянцев Ю.С., Морозова Л.В., Терехин А.Л. Исследование усталостной долговечности алюминиевых сплавов 1163-Т и В95о.ч.-Т2 после поверхностного упрочнения. ISSN: 2071-9140 // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S4. С. 93–102. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-S4-93-102.
6. Ерасов В.С., Гриневич А.В., Сенник В.Я., Коновалов В.В., Трунин Ю.П., Нестеренко Г.И. Расчетные значения характеристик прочности авиационных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2 (23). С. 14–16.
7. Расчетные значения характеристик авиационных металлических конструкционных материалов // Авиационный справочник А.С. 1.1.М.001-2012. М.: ОАК, ЦАГИ, 2013. 302 с.
8. Воробьев А.З., Богданов Б.Ф., Олькин Б.И. Влияние высокой температуры на выносливость элементов конструкции // Труды ЦАГИ. 1972. Вып. 1417. С. 53–72.
9. Богданов Б.Ф., Колганова З.Н. Влияние длительных выдержек при высокой температуре на выносливость алюминиевых и титановых сплавов. Труды ЦАГИ. 1970. Вып.1239. С. 3–10.
10. Хэйвуд Р.Б. Проектирование с учетом усталости. М.: Машиностроение, 1969. 37 с.
11. Gordon D.E., Chuang S.Y. Correlation between modulus and yield strength in Ti–25Al–10Nb–3V–1Mo (a/o) // Journal of materials science letters. 1994. Vol. 13. P. 1397–1399.
12. Басов В.Н., Нестеренко Г.И. Прочность и усталость материалов обшивки конструкций гражданских самолетов // Научный Вестник МГТУГА. 2010. №153. С. 15–23.
13. Pavlina E.J., Van Tyne C.J. Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels // Journal of Materials Engineering and Performance. 2008. Vol. 17 (6). P. 893.
14. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали, 2-е изд. М.: МИСИС, 1999. С. 215–216.