

05

Механические свойства алюминиевого сплава RS-553 при высоких скоростях деформации

© Г.Г. Савенков¹, Е.И. Пантелеева¹, Е.В. Щукина¹, А.К. Ломунов²¹ АО „Концерн „МПО-Гидроприбор“, Санкт-Петербург, Россия² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

E-mail: sav-georgij@yandex.ru

Поступило в Редакцию 21 февраля 2025 г.

В окончательной редакции 29 мая 2025 г.

Принято к публикации 30 мая 2025 г.

Представлены результаты исследований динамических свойств образцов порошкообразного алюминиевого сплава RS-553, полученных аддитивной технологией (3D-печать) методом селективного лазерного сплавления. Исследования выполнены с использованием традиционного метода Кольского на разрезном стержне Гопкинсона при скоростях деформации $\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$.

Ключевые слова: разрезной стержень Гопкинсона, алюминиевый сплав RS-553, механические свойства, аддитивные технологии.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.16.60928.20292

В настоящее время в различных отраслях машиностроения для производства корпусных конструкций применяются или находятся на стадии внедрения коррозионно-стойкие алюминиевые сплавы системы Al–Mg–Sc. Эти сплавы уже зарекомендовали себя в авиастроении и внедряются в судостроении. Применение скандийсодержащих сплавов обусловлено комплексом их высоких физико-механических и технологических характеристик [1] (по сравнению с алюминий-магниевыми сплавами).

Однако даже содержание около 0,2–0,3 % скандия в сплавах Al–Mg приводит к существенному удорожанию полуфабрикатов, что сдерживает их применение в более массовых отраслях промышленности, таких как автомобилестроение или судостроение. В части широкого применения алюминиевых сплавов системы Al–Mg–Sc представляется перспективным внедрение аддитивных технологий, которые позволяют при изготовлении изделий резко снизить отходы материала, в то время как при изготовлении деталей механическими методами отходы могут достигать до 70 % [2]. В этом случае возможно снизить стоимость готового изделия до уровня или даже ниже стоимости аналогичного изделия, получаемого с помощью традиционных технологий.

Один из перспективных сплавов для авиа- и судостроения — порошкообразный алюминиевый скандийсодержащий высокопрочный термически неупрочняемый сплав RS-553. Порошкообразный алюминиевый сплав RS-553 (ТУ 24.42.00-002-44669951-2019) предназначен для изготовления изделий методами аддитивных технологий.

Достаточно часто изделия авиационного и кораблестроительного назначения эксплуатируются в экстремальных внешних условиях, когда их конструктивные элементы подвергаются динамическим (ударным) на-

грузкам. Поэтому для прогнозирования поведения материалов в условиях ударного воздействия необходимо иметь сведения об их механических динамических характеристиках. Настоящая работа посвящена определению механических характеристик сплава RS-553 при высоких скоростях деформации ($\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$).

Образцы для динамических и статических испытаний изготовлены из порошкообразного алюминиевого сплава RS-553 системы Al–Mg–Sc с фракцией порошка 20–45 μm . Содержание скандия в сплаве RS-553 $\sim 0,3 \text{ mass\%}$. Прутки диаметром 11 mm для изготовления образцов получены при помощи технологии 3D-печати — селективного лазерного сплавления в вертикальной плоскости печати с последующим отжигом.

Образец для статических испытаний изготовлен в соответствии с ГОСТ 1497–2023 (тип III). Определение статических характеристик произведено на универсальной испытательной разрывной машине W+b LFM-50kH. Образец для динамических испытаний представлен в работе [3]. Определение динамических характеристик алюминиевого сплава RS-553 проводилось на экспериментальной установке, реализующей метод Кольского с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Экспериментальная установка представлена в работе [4].

Динамическая диаграмма деформирования (растяжения) образца в рамках метода Гопкинсона строилась в координатах „истинное напряжение“ (σ_{tr}) — „истинная (логарифмическая) деформация“ (ε_{tr}). Истинное напряжение рассчитывалось по формуле

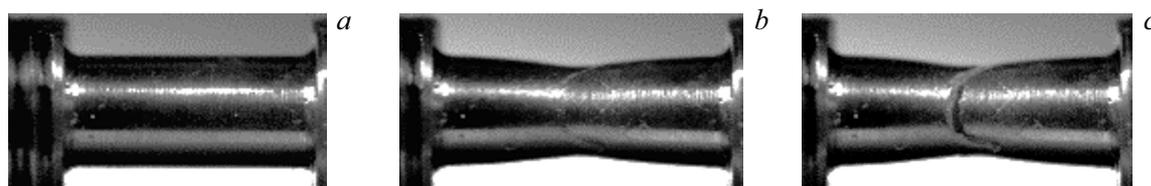
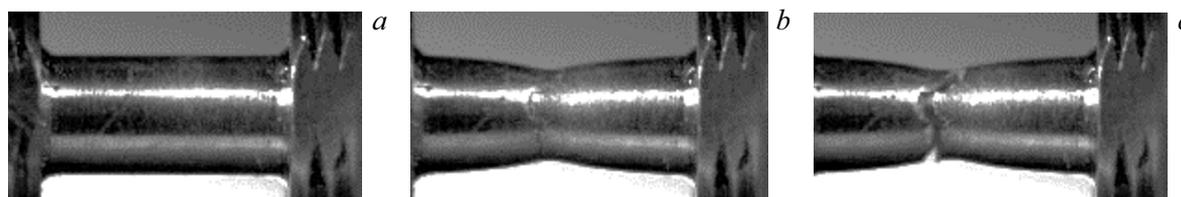
$$\sigma_{tr} = \sigma(t)(1 + \varepsilon(t)), \quad (1)$$

подсчет истинной (логарифмической) деформации осуществлялся по формуле

$$\varepsilon_{tr} = \ln(1 + \varepsilon(t)), \quad (2)$$

Результаты статических и динамических испытаний на растяжение

Вид испытания	Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$, s^{-1}	Истинный предел прочности σ_B , МПа	Истинный предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %
Динамическое (ударное)	$(0.6-0.8) \cdot 10^3$	505 ± 20	505 ± 20	18 ± 4	35 ± 6
	$(0.9-1.4) \cdot 10^3$	510 ± 20	510 ± 20	20 ± 4	36 ± 4
	$(1.6-1.9) \cdot 10^3$	520 ± 15	520 ± 15	19 ± 5	35 ± 12
Статическое	1 mm/min	460 ± 5	425 ± 5	13 ± 5 (δ_s)	16 ± 4

Рис. 1. Разрыв образца при скорости деформации $1.4 \cdot 10^3 s^{-1}$.Рис. 2. Разрыв образца при скорости деформации $1.9 \cdot 10^3 s^{-1}$.

где $\sigma(t)$ — среднее напряжение в образце в момент времени t , $\varepsilon(t)$ — средняя относительная деформация образца в тот же момент времени t [5].

Результаты динамических и статических испытаний сплава RS-553 представлены в таблице. Статистический анализ результатов проведен в соответствии с [6]. Доверительные интервалы рассчитаны для коэффициента доверительной вероятности 0.9 с коэффициентом Стьюдента 2.9.

На представленных кадрах (рис. 1, 2) при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 1.4 \cdot 10^3$ и $1.9 \cdot 10^3 s^{-1}$ видно, что наблюдается постепенное образование шейки с последующим разрывом образца в самом тонком месте. При скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 1.4 \cdot 10^3 s^{-1}$ разрушение происходит в виде среза материала (сдвиговая деформация). При скорости деформации $\dot{\varepsilon} = 1.9 \cdot 10^3 s^{-1}$ разрушение материала происходит в виде некоего квазиотрыва (отрыва, имеющего следы пластической деформации), что, вероятно, связано либо с большей степенью охрупчивания материала с ростом скорости деформации, либо с наличием в образце исходных микродефектов.

Примеры диаграмм нагружения представлены на рис. 3. Как видно из представленного рисунка, предел текучести практически совпадает с пределом прочности в отличие от статических испытаний (см. таблицу).

В сравнении со стандартными механическими характеристиками динамический предел прочности сплава RS-553 на 10–15 % больше статического предела прочности. Разница между истинным динамическим пределом прочности и динамическим пределом прочности при малых деформациях не превышает 2 %.

Однако значения динамического относительного сужения более чем в 2 раза превышают статические значения данного параметра, являющегося характеристикой пластичности материала [7]. В то же время достаточно долго, начиная с работы Давиденкова [8], полагали, что увеличение скорости деформации приводит к охрупчиванию материала. Но в работах [9–11] был сделан вывод о том, что для некоторых металлических материалов (алюминиевый сплав системы Al–Mg–Li, стали марок 35XC3MA, АК-25 и титановый сплав BT23) повышение скорости деформации приводит к повышению пластических характеристик.

Сравнение по относительному удлинению, также являющемуся характеристикой пластичности, ввиду разной длины образцов некорректно.

Можно отметить, что динамический предел прочности у алюминиевого сплава 1575-1 системы Al–Mg–Sc равен 450 МПа [3], содержание скандия в этом сплаве составляет 0.12–0.2 % Sc [12], что меньше, чем у сплава RS-553.

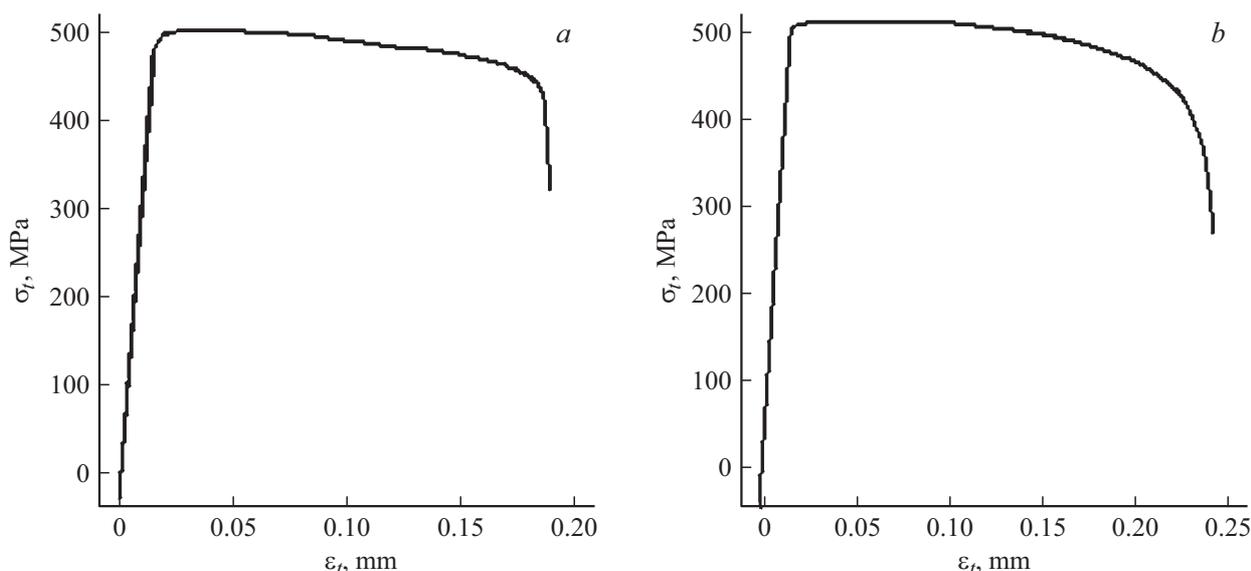


Рис. 3. Примеры диаграмм нагружения при $\dot{\varepsilon} = 1.4 \cdot 10^3$ (a) и $1.9 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ (b).

На основе проведенных экспериментальных исследований алюминиевого сплава RS-553 при скоростях деформации в диапазоне $\dot{\varepsilon} = (0.6-1.9) \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ можно сделать вывод о его высокой удельной динамической прочности и пластичности, что позволяет рекомендовать его в качестве конструкционного материала для изделий, изготавливаемых методами аддитивных технологий, которые должны обладать относительно невысокими массогабаритными параметрами и работать в условиях экстремальных внешних нагрузок.

Финансирование работы

Работа частично выполнена при финансовой поддержке государственного задания Минобрнауки России (проект № FSWR-2023-0036).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Д.К. Рябов, А.В. Панов, А.В. Виноградов, А.Ю. Крохин, *Технология легких сплавов*, № 2, 23 (2021). DOI: 10.24412/0321-4664-2021-2-23-31
- [2] О.Н. Гончарова, Ю.М. Бережной, Е.Н. Бессарабов, Е.А. Кадамов, Т.М. Гайнутдинов, Е.М. Нагопетьян, В.М. Ковина, *Инженерный вестник Дона*, № 4 (2016). ivdon.ru/tu/magazine/archive/n4y2016/3931
- [3] А.В. Кузнецов, Г.Г. Савенков, Е.В. Щукина, *Тр. ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*, № 91, 63 (2016).
- [4] А.М. Брагов, Л.А. Игумнов, А.Ю. Константинов, А.К. Ломунов, *Высокоскоростная деформация материалов различной физической природы* (Изд-во ННГУ, Н. Новгород, 2020).
- [5] А.М. Брагов, А.К. Ломунов, *Использование метода Кольского для исследования процессов высокоскоростного деформирования материалов различной физической природы* (Изд-во ННГУ, Н. Новгород, 2017).
- [6] М.Н. Степнов, *Статистические методы обработки результатов механических испытаний* (Машиностроение, М., 1985).
- [7] Я.Б. Фридман, *Механические свойства металлов* (Машиностроение, М., 1974), ч. 2.
- [8] Н.Н. Давиденков, *Динамические испытания металла* (Госиздат, М.-Л., 1929).
- [9] Б.А. Дроздовский, Л.В. Проходцева, И.А. Жегина, Н.С. Герчикова, *Физико-химическая механика материалов*, № 6, 26 (1985).
- [10] В.А. Drozdovskii, I.P. Zhagina, N.I. Novosil'tseva, A.V. Prokhotseva, *Sov. Mater. Sci.*, **28** (1), 30 (1993).
- [11] А.М. Брагов, А.В. Кузнецов, Г.Г. Савенков, Т.И. Сычева, Е.В. Щукина, *Прикладная механика и техническая физика*, **62** (1), 119 (2021). DOI: 10.15372/PMTF20210113
- [12] Е.П. Осокин, Н.Н. Барахтина, В.И. Павлова, Е.А. Алифиренко, С.А. Зыков, *Технология легких сплавов*, № 3, 69 (2022). DOI: 10.24412/0321-4664-2022-3-69-84