

УДК 620.194.22

ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПРИ МАЛЫХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ В НОРМАЛЬНЫХ И АГРЕССИВНЫХ УСЛОВИЯХ

© В. В. Семенычев, Р. К. Салахова¹*Статья поступила 23 июля 2014 г.*

Исследованы характеристики, полученные при разрушении образцов, вырезанных из плит и прессованного профиля алюминиевого сплава Д16чТ. Испытания проведены на разрывной машине УМЭ-10тм на воздухе и в 3 %-ном растворе NaCl при малых скоростях деформации. Исследованы такие характеристики разрушения образцов, как время до разрушения, работа разрушения, относительное удлинение, относительное сужение, максимальное напряжение и максимальная нагрузка. Данные характеристики получены при скоростях деформации от $4,2 \cdot 10^{-5}$ до $4,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. Сопоставление исследуемых характеристик, полученных при испытаниях на воздухе и в 3 %-ном растворе NaCl, позволило установить, что наиболее чувствительными из них, оценивающими склонность исследованных полуфабрикатов сплава Д16чТ к коррозионному растрескиванию являются время до разрушения и работа разрушения. Для образцов, вырезанных из плит, чувствительным оказалось относительное удлинение, в отличие от образцов из прессованных панелей, для которых относительное удлинение практически не изменилось.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы; коррозионное растрескивание; малые скорости деформации; характеристики разрушения.

Разрабатываемые новые материалы должны обладать служебными характеристиками, обеспечивающими реализацию замыслов конструкторов в изделиях различных отраслей промышленности [1]. Это в полной мере относится и к алюминиевым сплавам, применение которых повышает весовую эффективность изделий [2]. Поэтому эти сплавы остаются базовыми конструкционными материалами планеров, эксплуатирующихся в различных климатических условиях [3, 4].

В связи с огромными потерями от коррозии (в США в 2011 г. они составили 468 млрд дол.) [5] изучению коррозионной стойкости материалов уделяется повышенное внимание [6 – 9]. Много публикаций посвящено исследованиям, в которых коррозионная стойкость полуфабрикатов является критерием оценки правильности выбора технологий их изготовления [10, 11], а также вопросам прогнозирования коррозионной стойкости материалов [12].

Испытания на коррозионную стойкость материалов проводят как в естественных климатических условиях, так и в искусственных средах [13 – 15]. Встречаются работы, в которых коррозионные поражения оценивают нетрадиционными способами, например, путем измерения твердости [16]. Оценку стойкости материалов к различным средам проводят также, определяя те или иные механические характеристики [17, 18].

Наиболее опасным видом коррозии является коррозионное растрескивание, которое определяется составом и структурой сплава, коррозионной средой и величиной растягивающих напряжений [19].

Информативность испытаний различных материалов на склонность к коррозионному растрескиванию, как правило, сводится лишь к оценке времени до разрушения образца при заданном уровне напряжений в той или иной среде и определению порогового напряжения ($\sigma_{кр}$), под которым понимают максимальное значение напряжений при котором не происходит разрушение образцов [20]. Это практически единственные итоговые характеристики, которые могут быть выражены числовыми значениями. Существует множество способов оценки материалов на склонность к коррозионному растрескиванию, среди которых следует выделить два вида испытаний — при постоянной нагрузке и при постоянной деформации [21]. Каждый из них имеет как свои преимущества, так и свои недостатки, однако информационность обоих видов испытаний невысока.

Нами опробован метод ускоренных испытаний материалов на склонность к коррозионному растрескиванию, основанный на низких скоростях деформации образца, находящегося в коррозионной среде [20].

Образцы вырезали в направлении высоты из плиты и прессованного профиля алюминиевого сплава Д16чТ. Испытывали круглые образцы (тип IV, № 8) согласно требованиям ГОСТ 1497.

Испытания образцов проводили на универсальной испытательной машине УМЭ-10тм при растяжении

¹ Ульяновский научно-технологический центр Всероссийского института авиационных материалов (УНТЦ ВИАМ), г. Ульяновск, Россия; e-mail: lab2viam@mail.ru

со скоростью движения активного захвата $8,33 \cdot 10^{-5}$, $1,6 \cdot 10^{-4}$ и $8,33 \cdot 10^{-4}$ мм/с. В качестве сравнительных сред использовали лабораторный воздух и 3 %-ный раствор NaCl.

Для каждого вида полуфабриката и каждой среды испытывали не менее трех образцов. При проведении испытаний на склонность к КР при малой скорости деформации оценивали следующие характеристики:

- работу разрушения A_p , Дж;
- время до разрушения τ_p , мин;
- относительное удлинение δ , %;
- относительное сужение ψ , %;
- максимальное напряжение $\sigma_{\max}$, МПа;
- максимальную нагрузку при растяжении $P_{\max}$, Н.

Скорость деформации (v_d) вычисляли исходя из скорости перемещения активного захвата испытательной машины (v_3) по формуле

$$v_3 = v_d L \text{ (м/с),}$$

где L — начальная расчетная длина образца, м.

Работу разрушения образца (A_p) определяли из графика зависимости нагрузка — время и находили по формуле

$$A_p = M_p M_t v_3 S_p \text{ (Дж),}$$

где M_p — масштаб оси «нагрузка» (Н/мм); M_t — масштаб оси «время» (мин/мм); v_3 — скорость движения захвата машины (м/мин); S_p — площадь под кривой нагрузка — время (мм²).

В таблице приведены результаты испытаний образцов из различных полуфабрикатов сплава Д16чТ. Видно, что при испытании образцов Д16чТ (плита) влияние коррозионной среды на характеристики сплава начинает сказываться уже при скорости деформации $4,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, например, относительное удлинение снизилось в два раза при равном времени до разрушения. Снижение скорости деформации до $8,33 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ привело к более заметному влиянию коррозионной среды на изучаемые характеристики. Так, на 20 % снизились время до разрушения и работа разрушения образцов, испытанных в 3 %-ном растворе NaCl, по сравнению с аналогичными параметрами образцов, испытанных на воздухе. Снизились также характеристики пластичности. Наибольший эффект влияния

коррозионной среды отмечен при испытании образцов со скоростью деформации $4,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$: на 35 % снизилось время до разрушения, в два раза работа разрушения, в два раза — относительные удлинение и сужение и на 10 % — прочность образцов. Следовательно, для образцов, изготовленных из плиты сплава Д16чТ, в качестве ускоренной методики оценки склонности к КР можно рекомендовать сравнительные испытания на воздухе и в 3 %-ном растворе NaCl при скорости деформации $v_d = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$.

Аналогичные исследования проведены на образцах, изготовленных из прессованного профиля сплава Д16чТ. Чувствительность к коррозионной среде этих образцов начинает существенно проявляться при более высоких скоростях деформации, чем образцов, изготовленных из плит этого сплава. Так, при скорости деформации $4,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ время до разрушения и работа разрушения образцов, испытанных в 3 %-ном растворе NaCl, снизились на 30 % по сравнению с аналогичными параметрами образцов, испытанных на воздухе. Уменьшение скорости деформации до $8,33 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ привело к наибольшему проявлению эффекта воздействия коррозионной среды: снизились время до разрушения и работа разрушения образцов в 3 %-ном растворе NaCl на 30 и 40 % соответственно по сравнению с данными параметрами образцов, испытанных на воздухе. Кроме того, в два раза снизилось относительное сужение и на 5–10 % — прочность.

Дальнейшее снижение скорости деформации до $4,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ не привело к более заметному эффекту воздействия коррозионной среды. Следует отметить, что относительное удлинение оказалось для этих образцов характеристикой, не чувствительной к испытательной среде, в отличие от образцов, изготовленных из плит. Таким образом, для образцов, вырезанных из прессованного профиля сплава Д16чТ, наиболее чувствительными к воздействию коррозионной среды следует принять испытания при скорости деформации $v_d = 8,33 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, т.е. в два раза большей, чем для образцов, изготовленных из плит того же сплава.

Результаты проведенных исследований показали, что примененный метод оценки склонности алюминиевых сплавов к коррозионному растрескиванию позволяет проводить сравнение по шести характе-

Результаты испытаний образцов при низких скоростях деформации

Материал	$v_d, \text{с}^{-1}$	τ_p , мин	A_p , Дж	δ , %	ψ , %	$\sigma_{\max}$, МПа	$P_{\max}$, Н
Д16чТ, плита	$4,2 \cdot 10^{-5}$	60/60	13,6/13,6	10/5	4,5/3,3	442/430	5500/5350
	$8,33 \cdot 10^{-6}$	192/155	8,2/6,4	10/5	4,5/4,5	430/430	5450/5430
	$4,2 \cdot 10^{-6}$	357/232	7,2/3,5	10/5	4,5/2,4	419/378	5240/4740
Д16чТ, прессованный профиль	$4,2 \cdot 10^{-5}$	51/35	10,0/7,0	11,5/10	7,0/6,9	423/416	5450/5200
	$8,33 \cdot 10^{-6}$	206/133	8,1/4,4	10/10	6,8/3,2	408/381	5140/4880
	$4,2 \cdot 10^{-6}$	407/300	7,5/5,5	11,0/10	8,7/4,5	419/400	5410/5150

Примечание. В числителе приведены данные, полученные на воздухе, в знаменателе — в 3 %-ном растворе NaCl.

ристикам разрушения образцов, испытанных на воздухе и в коррозионной среде.

Сопоставление исследуемых характеристик, полученных при испытаниях на воздухе и в 3 %-ном растворе NaCl, позволило установить следующее:

наиболее чувствительными характеристиками, оценивающими склонность исследованных полуфабрикатов сплава Д16ЧТ к коррозионному растрескиванию, являются время до разрушения и работа разрушения, снижение которых составило от 40 до 50 %;

для образцов, вырезанных из плит, чувствительным к среде явилось относительное удлинение (снизилось на 50 %), в отличие от образцов из прессованных панелей, для которых относительное удлинение практически не изменилось;

для образцов, вырезанных из прессованных панелей, наиболее чувствительным к испытательной среде оказалось относительное сужение (снизилось на 50 %), которое для образцов из плит сохранилось на исходном уровне.

Таким образом, для разных полуфабрикатов наряду с характеристиками, одинаково чувствительными к испытательной среде существуют и характеристики, по-разному реагирующие на нее. Оптимальная скорость деформации для различных видов полуфабрикатов также может быть разной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7 – 17.
2. Антипов В. В. Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 157 – 166.
3. Антипов В. В., Сенаторова О. Г., Ткаченко Е. А., Вахромов Р. О. Алюминиевые деформируемые сплавы / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 167 – 182.
4. История авиационного материаловедения: ВИАМ — 75 лет поиска, творчества, открытий / Под общ. ред. Е. Н. Каблова. — М.: Наука, 2007. С. 77 – 86.
5. Каблов Е. Н. Коррозия или жизнь / *Наука и жизнь*. 2012. № 11. С. 16 – 21.
6. Каримова С. А., Жиликов В. П., Михайлов А. А., Чесноков Д. В., Игонин Т. Н., Карпов В. А. Натурно-ускоренные испытания алюминиевых сплавов в условиях воздействия морской атмосферы / *Коррозия: материалы, защита*. 2012. № 10. С. 1 – 3.
7. Жиликов В. П., Каримова С. А., Лешко С. С., Чесноков Д. В. Исследование динамики коррозии алюминиевых сплавов при испытаниях в камере солевого тумана (КСТ) / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 4. С. 18 – 22.
8. Синявский В. С., Калинин В. Д., Александрова Т. В. Новый метод ускоренных коррозионных испытаний алюминиевых сплавов / *Технология легких сплавов*. 2013. № 2. С. 89 – 93.
9. Синявский В. С. Влияние начальных стадий атмосферной коррозии на циклическую прочность алюминиевых сплавов / *Технология легких сплавов*. 2012. № 1. С. 93 – 97.
10. Колобнев Н. И., Махсидов В. В., Самохвалов С. В., Сбитнева С. В., Попов В. И., Курс М. Г. Влияние деформации после закалки и режимов старения на механические и кор-

розионные свойства сплава системы Al – Mg – Si – Cu – Zn / *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 1. С. 12 – 15.

11. Хохлатова Л. Б., Колобнев Н. И., Антипов В. В., Каримова С. А., Рудаков А. Г., Оглодков М. С. Влияние коррозионной среды на скорость роста трещины усталости в алюминиевых сплавах / *Авиационные материалы и технологии*. 2011. № 1. С. 16 – 20.
12. История авиационного материаловедения. ВИАМ — 80 лет: годы и люди / Под общ. ред. Е. Н. Каблова. — М.: ВИАМ, 2012. С. 211 – 222.
13. Семенычев В. В., Салахова Р. К. Склонность к локальным видам коррозии крупногабаритных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов / *Технология легких сплавов*. 2013. № 3. С. 121.
14. Семенычев В. В. Влияние концентрации хлоридов на коррозию листов из сплава Д16ЧТ в условиях морских субтропиков / *Изв. Самарского научного центра РАН*. 2012. Т. 14. № 4(3). С. 791 – 797.
15. Каблов Е. Н., Старцев О. В., Медведев И. М., Панин С. В. Коррозионная агрессивность приморской атмосферы. Ч. 1. Факторы влияния (обзор) / *Коррозия: материалы, защита*. 2013. № 12. С. 6 – 18.
16. Старцев О. В., Медведев И. М., Курс М. Г. Твердость как индикатор коррозии алюминиевых сплавов в морских условиях / *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 3. С. 16 – 19.
17. Ерасов В. С., Байрамуков Р. Р. Роль фактора времени при проведении механических испытаний, обработке данных и предоставлении результатов / *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 2. С. 62 – 67.
18. Ерасов В. С., Крылов В. Д., Панин С. В., Гончаров А. А. Испытания полимерного композиционного материала на удар падающим грузом / *Авиационные материалы и технологии*. 2013. № 3. С. 60 – 64.
19. Квасов Ф. И., Фридляндер И. Н. Промышленные алюминиевые сплавы. — М.: Металлургия, 1984. — 528 с.
20. Синявский В. С., Вальков В. Д., Калинин В. Д. Коррозия и защита алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия. 1988. — 368 с.
21. Розенфельд И. Л., Жигалова К. А. Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов. — М.: Металлургия. 1966. — 348 с.

REFERENCES

1. Kablov E. N. Strategicheskie napravleniya razvitiya materialov i tekhnologii ikh pererabotki na period do 2030 goda / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N 5. P. 7 – 17 [in Russian].
2. Antipov V. V. Strategiya razvitiya titanovykh, magniemykh, berillievyykh i alyuminievyykh splavov / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N 5. P. 157 – 166 [in Russian].
3. Antipov V. V., Senatorova O. G., Tkachenko E. A., Vakhromov R. O. *Al'uminiyevyye deformatsionnyye splavy* / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N 5. P. 167 – 182 [in Russian].
4. Kablov E. N. (ed.). *Istoriya aviatsionnogo materialovedeniya: VIAM — 75 let poiska, tvorchestva, otkrytii*. — Moscow: Nauka, 2007. P. 77 – 86 [in Russian].
5. Kablov E. N. *Korroziya ili zhizn'* / *Nauka Zhizn'*. 2012. N 11. P. 16 – 21 [in Russian].
6. Karimova S. A., Zhilikov V. P., Mikhailov A. A., Chesnokov D. V., Igonin T. N., Karpov V. A. *Naturno-uskorennyye ispytaniya alyuminievyykh splavov v usloviyakh vozdeistviya morskoi atmosfery* / *Korroziya: Mater. Zashch.* 2012. N 10. P. 1 – 3 [in Russian].
7. Zhilikov V. P., Karimova S. A., Leshko S. S., Chesnokov D. V. *Issledovanie dinamiki korrozii alyuminievyykh splavov pri ispytanii v kamere solevogo tumana (KST)* / *Aviats. Mater. Tekhnol.* 2012. N 4. P. 18 – 22 [in Russian].

8. Sinyavskii V. S., Kalinin V. D., Aleksandrova T. V. Novyi metod uskorennykh korrozionnykh ispytaniy alyuminievykh splavov / Tekhnol. Legkikh Splavov. 2013. N 2. P. 89 – 93 [in Russian].
9. Sinyavskii V. S. Vliyanie nachal'nykh stadii atmosforno korrozii na tsiklicheskuuyu prochnost' alyuminievykh splavov / Tekhnol. Legkikh Splavov. 2012. N 1. P. 93 – 97 [in Russian].
10. Kolobnev N. I., Makhidov V. V., Samokhvalov S. V., Sbitneva S. V., Popov V. I., Kurs M. G. Vliyanie deformatsii posle zakalki i rezhimov stareniya na mekhanicheskie i korrozionnye svoystva splava sistemy Al – Mg – Si – Cu – Zn / Aviats. Mater. Tekhnol. 2011. N 1. P. 12 – 15 [in Russian].
11. Khokhlatova L. B., Kolobnev N. I., Antipov V. V., Karimova S. A., Rudakov A. G., Oglodkov M. S. Vliyanie korrozionnoi sredy na skorost' rosta treshchiny ustalosti v alyuminievykh splavakh / Aviats. Mater. Tekhnol. 2011. N 1. P. 16 – 20 [in Russian].
12. Kablov E. N. (ed.). Istoriya aviatsionnogo materialovedeniya. VIAM — 80 let: gody i lyudi. — Moscow: Izd. VIAM, 2012. P. 211 – 222 [in Russian].
13. Semenychev V. V., Salakhova R. K. Sklonnost' k lokal'nym vidam korrozii krupnogabaritnykh polufabrikatov iz alyuminievykh splavov / Tekhnol. Legkikh Splavov. 2013. N 3. P. 121 [in Russian].
14. Semenychev V. V. Vliyanie kontsentratsii khloridov na korroziyu listov iz splava D16chT v usloviyakh morskikh subtro-
pikov / Izv. Samarsk. Nauch. Tsentra RAN. 2012. Vol. 14. N 4(3). P. 791 – 797 [in Russian].
15. Kablov E. N., Startsev O. V., Medvedev I. M., Panin S. V. Korrozionnaya agressivnost' primorskoj atmosfery. Ch. 1. Faktory vliyaniya (obzor) / Korroziya: Mater. Zashch. 2013. N 12. P. 6 – 18 [in Russian].
16. Startsev O. V., Medvedev I. M., Kurs M. G. Tverdost' kak indikator korrozii alyuminievykh splavov v morskikh usloviyakh / Aviats. Mater. Tekhnol. 2012. N 3. P. 16 – 19 [in Russian].
17. Erasov V. S., Bairamukov R. R. Rol' faktora vremeni pri provedenii mekhanicheskikh ispytaniy, otrabotke dannykh i predstavlenii rezul'tatov / Aviats. Mater. Tekhnol. 2013. N 2. P. 62 – 67 [in Russian].
18. Erasov V. S., Krylov V. D., Panin S. V., Goncharov A. A. Ispytaniya polimernogo kompozitsionnogo materiala na udar padayushchim gruzom / Aviats. Mater. Tekhnol. 2013. N 3. P. 60 – 64 [in Russian].
19. Kvasov F. I., Fridlyander I. N. Promyshlennyye alyuminievye splavy. — Moscow: Metallurgiya, 1984. — 528 p. [in Russian].
20. Sinyavskii V. S., Val'kov V. D., Kalinin V. D. Korroziya i zashchita alyuminievykh splavov. — Moscow: Metallurgiya, 1988. — 368 p. [in Russian].
21. Rozenfel'd I. L., Zhigalova K. A. Uskorennyye metody korrozionnykh ispytaniy metallov. — Moscow: Metallurgiya, 1966. — 348 p. [in Russian].

УДК 620.172.22:676.017

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ КОНСТАНТ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ В ПЛОСКОСТИ ЛИСТА

© Я. В. Казаков, О. Я. Казакова, Т. Н. Манахова, А. В. Малков¹

Статья поступила 3 сентября 2014 г.

Представлены результаты определения модулей упругости E_{11} и E_{22} , коэффициентов Пуассона ν_{12} и ν_{21} и модуля сдвига G_{12} наиболее распространенных целлюлозно-бумажных материалов в условиях одноосного растяжения с постоянной скоростью для режима плоского напряженного состояния. Эксперименты проведены на вертикальной разрывной машине с микропроцессорным управлением с получением зависимости напряжение – деформация, использована цифровая фотосъемка с высоким разрешением для регистрации продольных и поперечных деформаций. Подтверждена анизотропия целлюлозно-бумажных материалов по модулям упругости и коэффициентам Пуассона и установлены величины и пределы варьирования упругих констант для основных видов бумаги и картона.

Ключевые слова: бумага; картон; модуль упругости; коэффициент Пуассона; модуль сдвига; анизотропия.

Бумага и картон — это волокнистые материалы на основе растительных полимеров, которые должны обладать заданным уровнем прочностных и деформационных свойств. В процессах переработки и использования бумага и картон подвергаются воздействию различного вида нагрузок.

Бумага представляет собой сложный гетерогенный материал, состоящий главным образом из растительных волокон, волокнистой мелочи и минеральных наполнителей [1]. Свойства материала зависят от его композиции и технологического режима изготовления. Благодаря волокнистой природе и существующей технологии изготовления свойства бумаги и картона различны в трех главных направлениях: машинном (MD, machine direction), совпадающем с направлением

¹ ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова», г. Архангельск, Россия; e-mail: j.kazakov@narfu.ru