

УДК 620.178.311.4

doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-29-33

Специфика исследования контактной усталости алюминиевых образцов

А.В. Медовщиков

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Specifics in studying the aluminum contact fatigue

A.V. Medovshchikov

Bauman Moscow State Technical University

Алюминиевые сплавы нашли применение практически во всех отраслях промышленности. Некоторые изделия машиностроения работают в условиях циклически повторяющейся контактной нагрузки. По истечении определенного количества циклов нагружения такие изделия подвержены усталостному разрушению. Методики по определению их ресурса базируются на усталостных кривых при контактном взаимодействии, но для алюминиевых сплавов таких кривых практически нет. Для получения усталостной кривой при контактном взаимодействии определена база испытаний и проведен эксперимент по обкатыванию цилиндрических образцов из алюминиевого сплава до усталостного разрушения. По результатам эксперимента построена кривая контактной усталости.

Ключевые слова: контактная усталость, алюминиевые сплавы, испытания на контактную усталость

Aluminum alloys found their application in almost all industries. Certain mechanical engineering products operate under conditions of the cyclically repeating contact load. After a certain number of loading cycles, such products are subject to fatigue destruction. Methods in their service life determination are based on the fatigue curves at the contact interaction. For the aluminum alloys, fatigue curves at the contact interaction are practically missing. To obtain a fatigue curve at contact interaction, a test base was determined, and an experiment was carried out on rolling the aluminum alloy cylindrical samples to the fatigue destruction. Based on the experiment result, the contact fatigue curve was constructed.

Keywords: contact fatigue, aluminum alloys, contact fatigue testing

Зубчатые передачи относятся к наиболее часто встречающимся изделиям, работающим в условиях циклически повторяющейся контактной нагрузки. В целях уменьшения массы изделия и стоимости изготовления цилиндрические зубчатые колеса изготавливают из алюминиевых сплавов [1–6].

Чаще всего зубчатые передачи выходят из строя вследствие усталостного излома зуба или образования ямок на поверхности обкатывания зубьев [7–12]. Процесс образования ямок, вызванного обкатыванием зубьев по поверхности друг друга, называют усталостным выкрашива-

нием. Существующие методики расчета ресурса зубчатой передачи базируются на определении предела контактной выносливости.

Предел контактной выносливости находят по усталостным кривым для используемого материала. Для большинства сталей, чугунов и бронз в специальной литературе указаны значения предела контактной выносливости, а для алюминиевых сплавов можно найти только усталостные кривые при симметричном изгибе.

Цель работы — экспериментальное исследование по определению контактной усталости

алюминиевого сплава и построение кривой контактной усталости.

Для достижения поставленной цели проводили испытания по обкатыванию алюминиевых образцов. В качестве испытуемого материала выступал дюралюминиевый сплав 2024-Т3, широко применяемый в промышленности.

Экспериментальное исследование по определению контактной усталости двух цилиндрических образцов выполняли в условиях чистого качения на машине трения СМТ-1. Схемы алюминиевого образца и его испытания по определению контактной усталости приведены на рис. 1, а и б, а внешний вид машины трения СМТ-1 — на рис. 2.

В качестве материала контрообразца использовали сталь 40Х, закаленную до твердости 45 HRC по шкале Роквелла. Такой выбор материала для контрообразца обусловлен тем, что

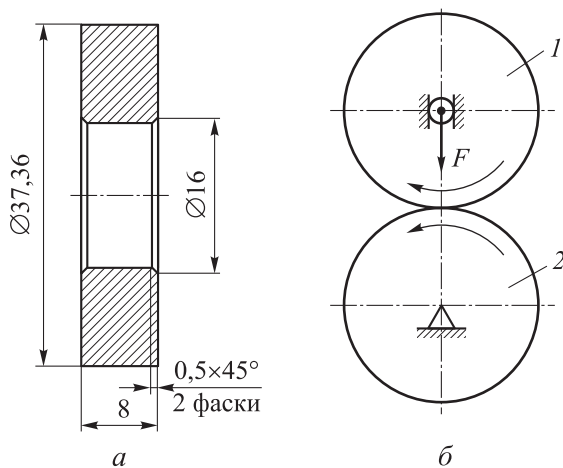


Рис. 1. Схемы алюминиевого образца (а) и его испытания по определению контактной усталости (б):

1 — контрообразец; 2 — испытуемый образец

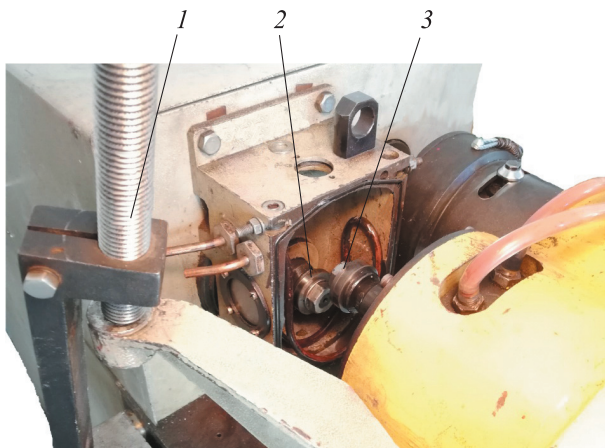


Рис. 2. Внешний вид машины трения СМТ-1: 1 — нагрузка; 2 — образец; 3 — контрообразец

разрушение должно было произойти только на образце из исследуемого алюминиевого сплава.

В движение образцы приводил асинхронный двигатель, управляемый посредством преобразователя частоты. Частота вращения двигателя составляла 700 мин^{-1} . При пуске машины включали секундомер, который фиксировал время работы.

При появлении характерного постукивания образцов машину останавливали для визуального контроля их рабочей поверхности. Если на поверхности испытуемого образца в разных местах появлялись ямки или ямка шириной больше половины ширины площадки контакта, то эксперимент прекращали и фиксировали время. Далее меняли образец и контрообразец, и эксперимент повторяли.

Эксперимент проводили на пяти уровнях нагрузки. На каждом уровне выполняли по шесть испытаний до наступления выкрашивания. Обычно базой испытания для цветных сплавов принимают $N = 5 \cdot 10^8$ циклов. Однако, согласно данным работы [13], для исследуемого сплава после $N = 2,3 \cdot 10^6$ циклов при снижении действующих напряжений менее определенного значения (до $N = 5 \cdot 10^8$) не происходит разрушения. В связи с этим для уменьшения времени испытаний за базовое принято $N = 2,3 \cdot 10^6$ циклов.

Для каждого уровня нагрузок рассчитывали среднее значение \bar{x} , среднее квадратическое отклонение σ и доверительный интервал. Среднее значение определяли по формуле

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n,$$

где n — суммарное число экспериментальных точек при каждом уровне нагрузок; x_i — число циклов в i -й экспериментальной точке.

Среднее квадратическое отклонение вычисляли как

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

Максимально допускаемое отклонение результатов измерений от среднего значения не должно превышать утроенного среднее квадратического отклонения. В этом случае доверительный интервал

$$[\bar{x} - 3\sigma, \bar{x} + 3\sigma].$$

Результаты экспериментального исследования приведены в таблице.

Результаты экспериментального исследования

Сила поджатия F , Н	Номер образца	Время до разрушения, мин	Число циклов до разрушения N	Среднее значение \bar{x}	Доверительный интервал
1820	1	200	140 000	139 066	[121972, 156160]
	2	205	143 500		
	3	210	147 000		
	4	197	137 900		
	5	188	131 600		
	6	192	134 400		
1445	7	471	329 700	333 550	[293869, 373231]
	8	480	336 000		
	9	492	344 400		
	10	467	326 900		
	11	448	313 600		
	12	501	350 700		
1100	13	1143	800 100	805 933	[673681, 938185]
	14	1050	735 000		
	15	1212	848 400		
	16	1110	777 000		
	17	1200	840 000		
	18	1193	805 933		
890	19	2143	1 500 100	1 489 833	[1287192, 1692474]
	20	2274	1 591 800		
	21	2010	1 407 000		
	22	2193	1 535 100		
	23	2100	1 470 000		
	24	2050	1 435 000		
760	25	3303	2 312 100	2 300 60	[2050142, 2553992]
	26	3285	2 299 500		
	27	3375	2 362 500		
	28	3164	2 214 800		
	29	3147	2 202 900		
	30	3458	2 420 600		

Для построения кривой контактной усталости рассчитывали контактное напряжение по формуле Герца [14]

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{FE^*}{\pi Rl}},$$

где F — сила поджатия; E^* — приведенный модуль упругости, $E^* = 5,84 \cdot 10^4$ МПа; R — при-

веденный радиус кривизны, $R = 9,3375$ мм; l — длина линии контакта, $l = 8$ мм.

Приведенный модуль упругости

$$E^* = \frac{(1-\mu_1)^2}{E_1} + \frac{(1-\mu_2)^2}{E_2},$$

где μ_1 , μ_2 и E_1 , E_2 — коэффициенты Пуассона модули упругости и образца и контрообразца соответственно.

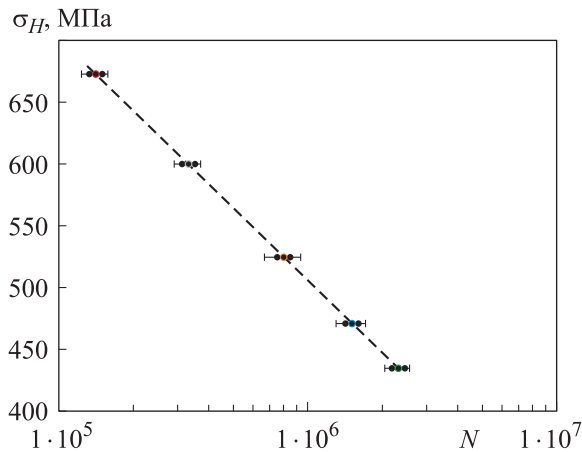


Рис. 3. Зависимость контактного напряжения σ_H от числа циклов до разрушения N алюминиевого сплава 2024-T3:
 • — экспериментальные данные;
 -- — результаты их аппроксимации

Приведенный радиус кривизны определяли из выражения

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},$$

где R_1 и R_2 — радиусы кривизны образца и контробразца.

Полученная кривая контактной усталости — зависимость контактного напряжения σ_H от числа циклов до разрушения N алюминиевого сплава 2024-T3 — приведена на рис. 3 в полулогарифмических координатах.

Как видно из рис. 3, экспериментальные данные аппроксимированы логарифмической кривой, что характерно для усталостных испытаний.

Вывод

Получен график контактной усталости алюминиевого сплава 2024-T3, который можно использовать для определения ресурса изделий, работающих в условиях циклического контактного взаимодействия.

Литература

- [1] Mehta D.S., Masood S.H., Song W.Q. Investigation of wear properties of magnesium and aluminum alloys for automotive applications. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, vol. 155–156, no. 1–3, pp. 1526–1531, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.247>
- [2] Mazlan S., Yidris N., Kooloor S.S.R. et al. Experimental and numerical analysis of fatigue life of aluminum Al 2024-T351 at elevated temperature. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 12, art. 1581, doi: <https://doi.org/10.3390/met10121581>
- [3] Karpat F., Yılmaz T.G., Doğan O. et al. Stress and mesh stiffness evaluation of bimaterial spur gears. *ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2019, paper V02BT02A025, doi: <https://doi.org/10.1115/IMECE2019-11554>
- [4] Venkatesh B., Kamala V., Prasad A.M.K. Modeling and analysis of aluminum A360 alloy helical gear for marine applications. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 124–134.
- [5] Babu N.S. Investigation on the comparison analysis of gear drive for robots. *IJIRSET*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 419–423.
- [6] Kaczmarek L., Kula P., Sawicki J. et al. New possibilities of applications aluminium alloys in transport. *Arch. Metall. Mater.*, 2009, vol. 54, no. 4, pp. 1199–1205.
- [7] Nursyifaulkhair D., Wijanarko R., Angela I. et al. Comparison of bending stress and contact stress of helical gear transmission using finite element method. *IJMERR*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 92–98, doi: <https://doi.org/10.18178/ijmerr>
- [8] Jagtap M.S., Kale M.A. Stress analysis for helical gear and development of new gear routing algorithm. *IJESMM*, 2022, vol. 2, no. 1. URL: http://iiardpub.in/assets/images/issues/pdf/cvNK7o_B4o4T3_K9Q5MO_j2Jm6D_131556.pdf
- [9] Ivanov A.S., Kuts M.S. Strength of the hypoid gear. *Russ. Engin. Res.*, 2016, vol. 36, no. 11, pp. 910–915, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X16110095>
- [10] Rajesh S., Marimuthu P., Babu P.D. et al. Contact fatigue life estimation for asymmetric helical gear drives. *Int. J. Fatigue*, 2022, vol. 164, art. 107155, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107155>
- [11] Feng W., Feng Z., Mao L. Failure analysis of a secondary driving helical gear in transmission of electric vehicle. *Eng. Fail. Anal.*, 2020, vol. 117, no. 7, art. 104934, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104934>
- [12] Asi O. Fatigue failure of a helical gear in a gearbox. *Eng. Fail. Anal.*, 2006, vol. 13, no. 7, pp. 1116–1125, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.07.020>

- [13] Military handbook. *Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures*. U.S. Department of defense, 1998. 1653 p.
- [14] Fischer-Cripps A.C. *Introduction to contact mechanics*. Springer, 2007. 226 p.

References

- [1] Mehta D.S., Masood S.H., Song W.Q. Investigation of wear properties of magnesium and aluminum alloys for automotive applications. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, vol. 155–156, no. 1–3, pp. 1526–1531, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.247>
- [2] Mazlan S., Yidris N., Koloor S.S.R. et al. Experimental and numerical analysis of fatigue life of aluminum Al 2024-T351 at elevated temperature. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 12, art. 1581, doi: <https://doi.org/10.3390/met10121581>
- [3] Karpat F., Yılmaz T.G., Doğan O. et al. Stress and mesh stiffness evaluation of bimaterial spur gears. *ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2019, paper V02BT02A025, doi: <https://doi.org/10.1115/IMECE2019-11554>
- [4] Venkatesh B., Kamala V., Prasad A.M.K. Modeling and analysis of aluminum A360 alloy helical gear for marine applications. *Int. J. Appl. Eng. Res.*, 2010, vol. 1, no. 2, pp. 124–134.
- [5] Babu N.S. Investigation on the comparison analysis of gear drive for robots. *IJIRSET*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 419–423.
- [6] Kaczmarek L., Kula P., Sawicki J. et al. New possibilities of applications aluminium alloys in transport. *Arch. Metall. Mater.*, 2009, vol. 54, no. 4, pp. 1199–1205.
- [7] Nursyifaulkhair D., Wijanarko R., Angela I. et al. Comparison of bending stress and contact stress of helical gear transmission using finite element method. *IJMERR*, 2019, vol. 8, no. 1, pp. 92–98, doi: <https://doi.org/10.18178/ijmerr>
- [8] Jagtap M.S., Kale M.A. Stress analysis for helical gear and development of new gear routing algorithm. *IJESMM*, 2022, vol. 2, no. 1. URL: http://iiardpub.in/assets/images/issues/pdf/cvNK7o_B4o4T3_K9Q5MO_j2Jm6D_131556.pdf
- [9] Ivanov A.S., Kuts M.S. Strength of the hypoid gear. *Russ. Engin. Res.*, 2016, vol. 36, no. 11, pp. 910–915, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X16110095>
- [10] Rajesh S., Marimuthu P., Babu P.D. et al. Contact fatigue life estimation for asymmetric helical gear drives. *Int. J. Fatigue*, 2022, vol. 164, art. 107155, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107155>
- [11] Feng W., Feng Z., Mao L. Failure analysis of a secondary driving helical gear in transmission of electric vehicle. *Eng. Fail. Anal.*, 2020, vol. 117, no. 7, art. 104934, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104934>
- [12] Asi O. Fatigue failure of a helical gear in a gearbox. *Eng. Fail. Anal.*, 2006, vol. 13, no. 7, pp. 1116–1125, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.07.020>
- [13] Military handbook. *Metallic materials and elements for aerospace vehicle structures*. U.S. Department of defense, 1998. 1653 p.
- [14] Fischer-Cripps A.C. *Introduction to contact mechanics*. Springer, 2007. 226 p.

Статья поступила в редакцию 13.04.2023

Информация об авторе

МЕДОВЩИКОВ Александр Вадимович — аспирант кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: alexmed@bmstu.ru).

Information about the author

MEDOVSHCHIKOV Alexander Vadimovich — Postgraduate, Department of Machine Design Principles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: alexmed@bmstu.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Медовщиков А.В. Специфика исследования контактной усталости алюминиевых образцов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 11, с. 29–33, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-29-33

Please cite this article in English as:

Medovshchikov A.V. Specifics in studying the aluminum contact fatigue. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 11, pp. 29–33, doi: 10.18698/0536-1044-2023-11-29-33