



Научная статья

УДК: 539.43

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189135>

EDN: <https://www.elibrary.ru/DCYTYV>

АНАЛИЗ КРИВЫХ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ ДЛЯ МАТЕРИАЛА ЭП741НП ПРИ РАЗНЫХ КОЭФФИЦИЕНТАХ АСИММЕТРИИ ЦИКЛА НАГРУЖЕНИЯ

А.М. Крупенин✉

Опытно-конструкторское бюро им. А. Люльки - филиал ОДК-Уфимского
моторостроительного производственного объединения,

г. Москва, Россия

✉ Zeus-RUSS@yandex.ru

Цитирование: Крупенин А.М. Анализ кривых малоциклового усталости для материала ЭП741НП при разных коэффициентах асимметрии цикла нагружения // Труды МАИ: электрон. журнал. № 149. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189135>

Аннотация. В работе проводится исследование кривых малоциклового усталости материала ЭП741НП при разных температурах и асимметриях цикла нагружения. Показано, что коэффициенты кривых малоциклового усталости имеют выраженную зависимость, как от температуры и от асимметрии цикла нагружения, так и между собой. Зависимость между коэффициентами кривых малоциклового усталости близка к линейной и статистически идентична для разных асимметрий цикла, что подразумевает наличие фокусной точки для кривых малоциклового усталости. Вводится гипотеза о том, что зависимость между коэффициентами кривых малоциклового усталости является постоянной для данного материала.

Ключевые слова: малоцикловая усталость; фокусная точка; долговечность; асимметрия цикла; ЭП741НП.

ANALYSIS OF LOW-CYCLE CURVES WITH DIFFERENT LOAD CYCLE ASYMMETRY

COEFFICIENTS FOR EP741NP MATERIAL

A.M. Krupenin✉

Lyulka Experimental Design Bureau - branch of the United Engine Corporation Ufa Engine

Industrial Association, Moscow, Russia

✉ Zeus-RUSS@yandex.ru

Citation: A.M. Krupenin Analysis of low-cycle curves with different load cycle asymmetry coefficients for EP741NP material // Trudy MAI. 2026. No. 149. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189135>

Abstract. The study investigates low-cycle fatigue curves of the EP741NP alloy at various temperatures and loading cycle asymmetries. It is demonstrated that the coefficients of the low-cycle fatigue curves exhibit a pronounced dependence on both the temperature and the loading cycle asymmetry, as well as on each other. The relationship between the fatigue curve coefficients is close to linear and statistically consistent across different loading cycle asymmetries, which suggests the existence of a focal point for the low-cycle fatigue curves. A hypothesis is proposed that the relationship between the low-cycle fatigue curve coefficients remains constant for this particular material.

Keywords: low-cycle fatigue; focal point; durability; cycle asymmetry; EP741NP.

Введение

Явление усталости широко распространено в разных областях техники, в том числе в аэрокосмической технике и авиационном двигателестроении [1-5].

Одним из основных факторов, повреждающих диски газотурбинных двигателей (ГТД) и энергетических установок (ГТУ) является малоцикловая усталость [6-14].

Расчеты деталей, долговечность которых определяется малоцикловой усталостью, необходимо выполнять по кривым малоцикловой усталости (МЦУ) материала [15-16].

При изготовлении дисков современных ГТД и ГТУ широко применяются гранулируемые никелевые сплавы, и в том числе сплав ЭП741НП.

В данной работе анализируются кривые малоциклового усталости материала ЭП741НП.

Кривые малоциклового усталости

Кривые малоциклового усталости получены в результате испытаний гладких цилиндрических образцов.

Материал образцов - никелевый гранулируемый сплав ЭП741НП, размер гранул которого не превышает 140 мкм. Образцы вырезаны из диска турбины высокого давления.

Поверхность образцов предварительно отшлифована с последующей полировкой в осевом направлении для исключения образования кольцевых рисок. Подобная схема полировки позволяет исключить зарождение усталостных трещин от рисок, оставшихся после механической обработки.

Испытание образцов на МЦУ проведено с использованием испытательных машин Instron 8862.

Испытания проведены в соответствии с ГОСТ 25.502-79 и ASTM E606 [17-18] при «жестком» цикле нагружения.

Общее количество испытанных образцов — 268 штук.

Параметры нагружения:

- температура испытаний T – диапазон значений от 350 °С до 750 °С;
- форма цикла – синусоидальная;
- частота нагружения – 1 Гц;
- контролируемый параметр в процессе нагружения – размах деформации в цикле $\Delta\varepsilon$, в диапазоне значений от 0,6 % до 3,0 %;
- без выдержки в цикле;
- коэффициент асимметрии цикла $R_\varepsilon = 0$ и $R_\varepsilon = 0,5$.

Размах деформаций в цикле вычисляется по формуле

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\text{макс}} - \varepsilon_{\text{мин}};$$

где

$\varepsilon_{\text{макс}}$ – максимальное значение деформации в цикле,

$\varepsilon_{\text{мин}}$ – минимальное значение деформации в цикле.

Коэффициент асимметрии в цикле вычисляется по формуле

$$R_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max}};$$

Далее по испытаниям получены средние (Рисунки 1-2) и минимальные (минус три среднеквадратичных отклонения) кривые МЦУ.

Кривые МЦУ получены в виде зависимостей

$$\lg(N) = C_1 \lg(\Delta\varepsilon) + C_0; \quad (1)$$

где N – долговечность в циклах; $\Delta\varepsilon$ – размахи полных деформаций в долях; C_1, C_0 – коэффициенты кривых МЦУ; $\lg$ – десятичный логарифм.

В данной работе проводится исследование полученных кривых МЦУ.

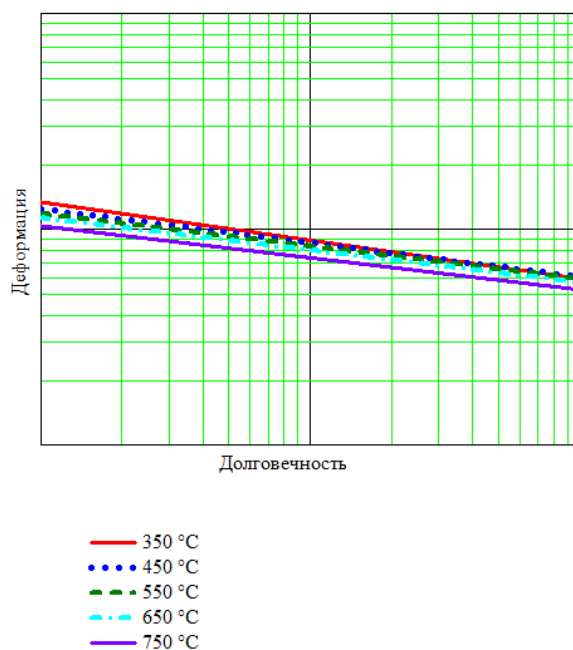


Рисунок 1 – Средние кривые МЦУ для коэффициента асимметрии цикла $R_{\varepsilon} = 0$

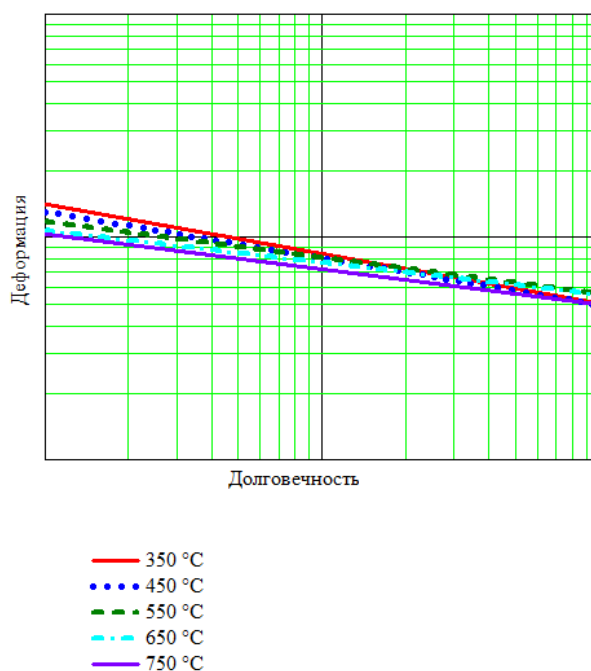


Рисунок 2 – Средние кривые МЦУ для коэффициента асимметрии цикла $R_{\varepsilon} = 0,5$

Описание сравнения линейных регрессий экспериментальных данных

Поскольку коэффициенты уравнения (1) являются случайными величинами, необходимо проверить, случайно ли различие между этими коэффициентами для разных экспериментальных выборок, или они действительно различаются.

Для проверки статистической идентичности полученных по разным опытным данным линий регрессий выдвигаются и проверяются в заданном порядке три гипотезы:

- гипотеза о равенстве дисперсий;
- гипотеза о равенстве коэффициентов при переменной;
- гипотеза о равенстве свободных коэффициентов.

При положительном удовлетворении всех трех гипотез можно считать, что гипотеза о равенстве линий регрессий полученных по разным опытным данным, не противоречит опытным данным.

Вывод данной проверки приведен в работе [19].

Проверка гипотезы о равенстве дисперсий. Для проверки гипотезы о равенстве дисперсий рассматривается отношение дисперсий линий регрессий, вычисленное по формуле

$$S_c = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (2) \text{ где } s_1^2 > s_2^2.$$

s_1^2, s_2^2 – оценки для дисперсии ошибки модели, соответственно первой и второй кривой.

Если гипотеза о равенстве дисперсий верна, то их отношение (2) подчиняется F-распределению.

Гипотеза о равенстве дисперсий отвергается с уровнем значимости α , если

$$S_c > f\left(1 - \frac{\alpha}{2}; n_1 - 2; n_2 - 2\right) \quad (3)$$

где $f\left(1 - \frac{\alpha}{2}; n_1 - 2; n_2 - 2\right)$ – квантиль распределения Фишера уровня α со степенями свободы $n_1 - 2$ и $n_2 - 2$;

α – уровень значимости;

n_1 – величина первой выборки;

n_2 – величина второй выборки.

Если гипотеза о равенстве дисперсий принимается, то можно образовать объединенную оценку дисперсии

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\frac{(n_1 - 2)s_1^2 + (n_2 - 2)s_2^2}{n_1 + n_2 - 4}} \quad (4)$$

Проверка гипотезы о равенстве коэффициентов при переменной

Для проверки гипотезы о равенстве коэффициентов при переменной рассматривается критерий

$$t_a = \frac{a_1 - a_2}{S_{\Sigma} \sqrt{\frac{1}{(n_1 - 1)s_{x1}^2} + \frac{1}{(n_2 - 1)s_{x2}^2}}} \quad (5)$$

где s_{x1}^2, s_{x2}^2 – выборочное значение дисперсии случайной величины x для первой и второй кривой соответственно.

Если гипотеза о равенстве коэффициентов при переменной верна, то соотношение (5) подчиняется распределению Стьюдента.

Гипотеза о равенстве коэффициентов при переменной отвергается с уровнем значимости α , если

$$|t_a| > t(1 - \frac{\alpha}{2}; n_1 + n_2 - 4) \quad (6)$$

где $t(1 - \frac{\alpha}{2}; n_1 + n_2 - 4)$ – квантиль распределения Стьюдента уровня α ;

Если гипотеза о равенстве коэффициентов при переменной принимается, то можно образовать объединенную оценку коэффициента при переменной

$$a_{\Sigma} = \frac{(n_1 - 1)s_{x1}^2 a_1 + (n_2 - 1)s_{x2}^2 a_2}{(n_1 - 1)s_{x1}^2 + (n_2 - 1)s_{x2}^2} \quad (7)$$

Проверка гипотезы о равенстве свободных коэффициентов. Для проверки гипотезы о равенстве свободных коэффициентов рассматривается критерий

$$t_b = \frac{(\bar{y}_1 - \bar{y}_2) - a_{\Sigma}(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{S_{Y\Sigma} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)^2}{(n_1 - 1)s_{x1}^2 + (n_2 - 1)s_{x2}^2}}} \quad (8)$$

$$S_{y\Sigma} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_{y1}^2 + (n_2 - 1)s_{y2}^2}{n_1 + n_2 - 3}} \quad (9)$$

где

s_{y1}^2, s_{y2}^2 – выборочное значение дисперсии случайной величины y для первой и второй кривой соответственно;

$\bar{x}_1, \bar{x}_2$ – среднеарифметическое значение случайной величины x для первой и второй кривой соответственно;

$\bar{y}_1, \bar{y}_2$ – среднеарифметическое значение случайной величины y для первой и второй кривой соответственно.

Если гипотеза о равенстве свободных коэффициентов верна, то соотношение (8) подчиняется распределению Стьюдента.

Гипотеза о равенстве свободных коэффициентов отвергается с уровнем значимости α , если

$$|t_b| > t\left(1 - \frac{\alpha}{2}; n_1 + n_2 - 3\right) \quad (10)$$

Сравнение кривых МЦУ материала ЭП741НП для разных асимметрий цикла

В данном разделе проведено сравнение средних кривых МЦУ для материала ЭП741НП, с целью установить, что различие в коэффициентах кривых для разных асимметрий цикла не является случайным.

Сравнение проведено для разных температур при разных асимметриях цикла по методике, описанной в разделе 3.

В таблице 1 приведены результаты сравнения, цветом закрашены ячейки, в которых соблюдаются неравенства (3) и (6).

Из таблицы 1 видно, что, при данном уровне значимости α , для кривых МЦУ при температуре 350 °С отвергается гипотеза о равенстве коэффициентов при переменной.

Из таблицы 1 видно, что, при данном уровне значимости α , для кривых МЦУ при температуре 550 °С отвергается гипотеза о равенстве дисперсий.

Кривые МЦУ для разных асимметрий цикла при температурах 450 °С, 650 °С и 750 °С статистически идентичны.

Таблица 1

Сравнение кривых МЦУ для разных асимметрий цикла

Параметры	Температура, °С				
	350	450	550	650	750
α	0,05				
S_c	1,46796	2,25322	3,37206	1,40003	1,31828
$f(1-\frac{\alpha}{2}; n_1-2; n_2-2)$	2,25507	2,25507	2,29864	2,22646	2,28912
t_a	2,11944	1,73377	0,50223	0,27065	0,63007
$t(1-\frac{\alpha}{2}; n_1+n_2-4)$	2,01063	2,01063	2,00958	2,00665	2,00856
t_b	0,73026	1,64967	0,71757	0,87098	0,41218
$t(1-\frac{\alpha}{2}; n_1+n_2-3)$	2,00958	2,00958	2,00856	2,00575	2,00758

С учетом данных таблицы 1, можно сделать предположение, что с ростом температуры влияние коэффициента асимметрии цикла на долговечность для материала ЭП741НП уменьшается.

Поскольку для части кривых при разных асимметриях цикла различие все же значимо, в дальнейшем будем исходить из предположения, что различие между кривыми МЦУ при разных асимметриях цикла значимо для всех температур.

Анализ коэффициентов кривых МЦУ материала ЭП741НП

В данном разделе проведено сравнение коэффициентов кривых МЦУ для разных асимметрий цикла.

На рисунке 3 приведены зависимости коэффициентов кривых МЦУ от температуры испытаний $C_1 = C_1(T)$, $C_0 = C_0(T)$ при разных коэффициентах асимметрии цикла.

Из рисунка видно, что коэффициенты для кривых МЦУ зависят от температуры испытаний, и в основном понижаются с увеличением температуры,

однако для $R_\varepsilon = 0,5$ при температуре 750°C наблюдается повышение коэффициентов.

Зависимость коэффициентов кривых МЦУ от температуры для асимметрии цикла $R_\varepsilon = 0$ имеет вид близкий к линейному для температур в диапазоне от 450°C до 750°C .

Коэффициенты кривых МЦУ в целом повышаются с ростом коэффициента асимметрии цикла для температур от 350°C до 550°C .

На рисунках 4-7 приведены зависимости свободных членов кривых МЦУ от коэффициентов при переменной $C_0 = C_0(C_1)$ для разных коэффициентов асимметрии цикла.

Рассматривается зависимость $C_0 = C_0(C_1)$ так как для средних и минимальных кривых МЦУ коэффициенты C_0 будут различаться, а коэффициенты C_1 будут одинаковыми.

Зависимость $C_0 = C_0(C_1)$ ищется в виде линейного уравнения

$$C_0 = a \cdot C_1 + b; \quad (11)$$

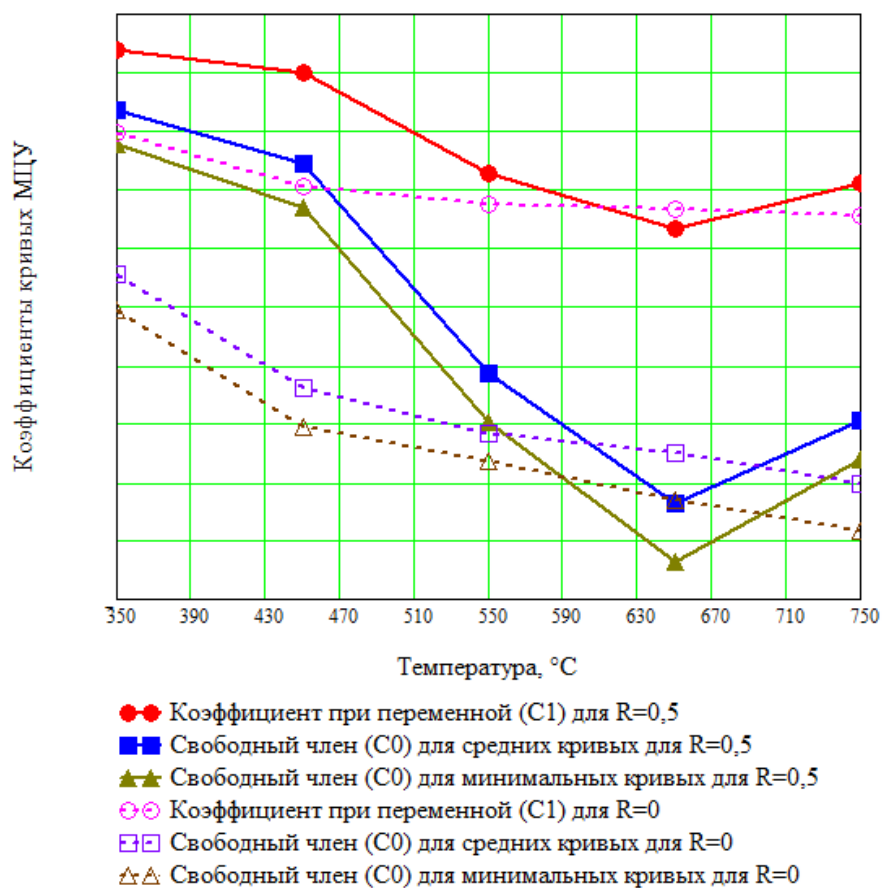


Рисунок 3 – Сравнение коэффициентов кривых МЦУ для асимметрии цикла $R_\varepsilon = 0$ и $R_\varepsilon = 0,5$ в зависимости от температуры

Далее проведена статистическая обработка взаимосвязи $C_0 = C_0(C_1)$. Найдены линейные уравнения регрессии и коэффициенты корреляции. Описание подобной обработки можно найти, например, в работе [20].

Анализ проводится отдельно для средних и для минимальных кривых МЦУ в связи с тем, что при построении минимальных кривых МЦУ дисперсия для разных температур испытаний разная.

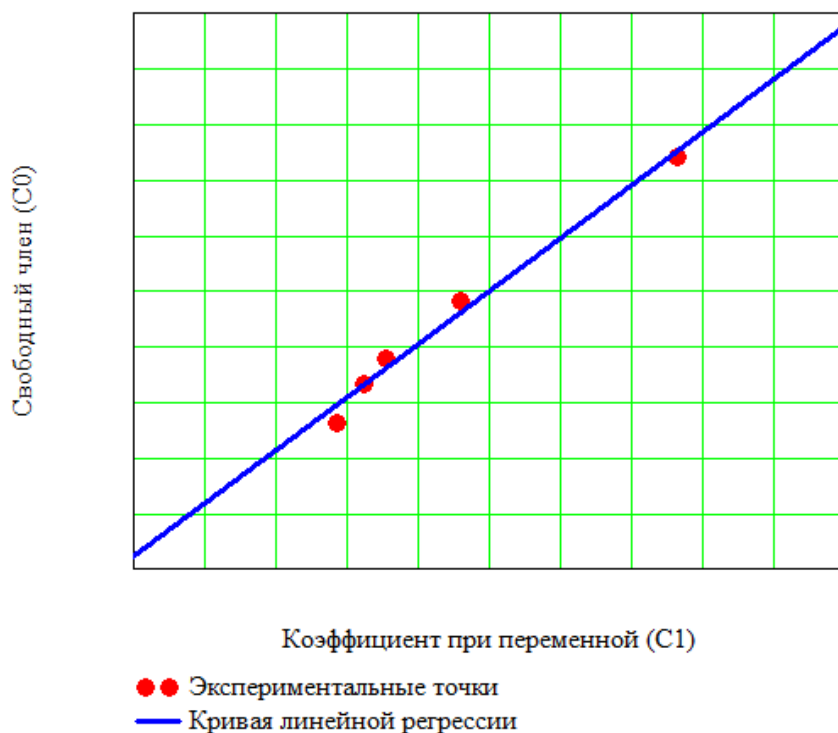


Рисунок 4 – Зависимость $C_0 = C_0(C_1)$ для средних кривых МЦУ при $R_\epsilon = 0$

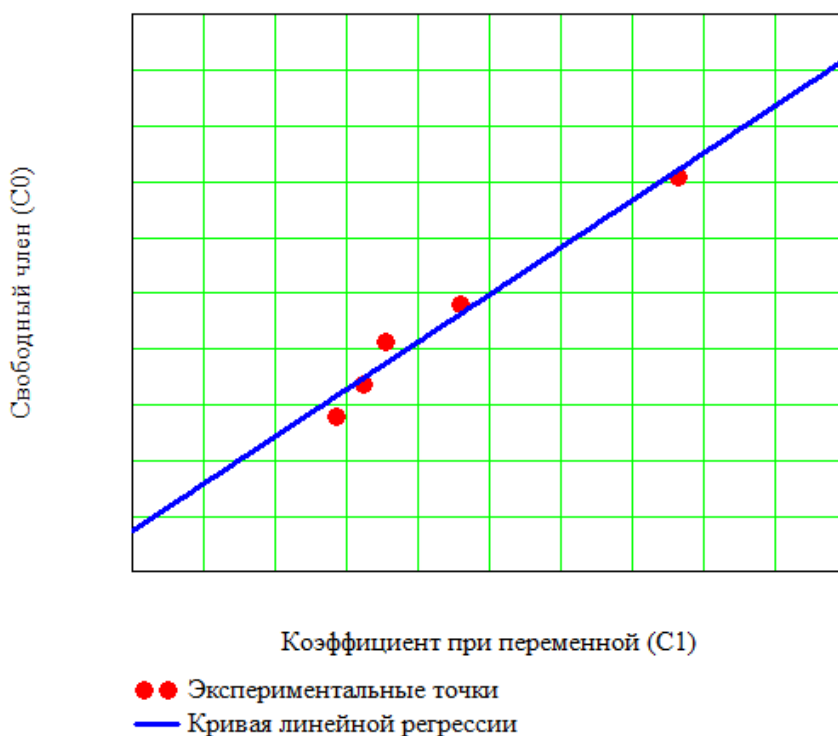


Рисунок 5 – Зависимость $C_0 = C_0(C_1)$ для минимальных кривых МЦУ при $R_\epsilon = 0$

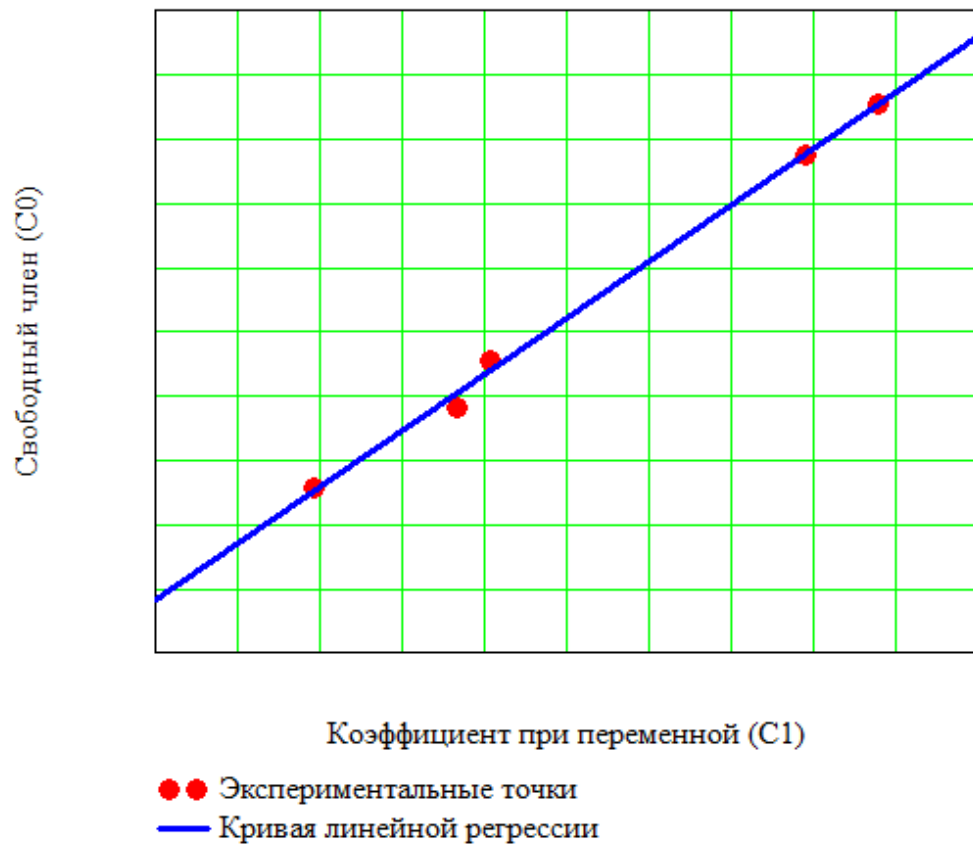


Рисунок 6 – Зависимость $C_0 = C_0(C_1)$ для средних кривых МЦУ при $Re = 0,5$

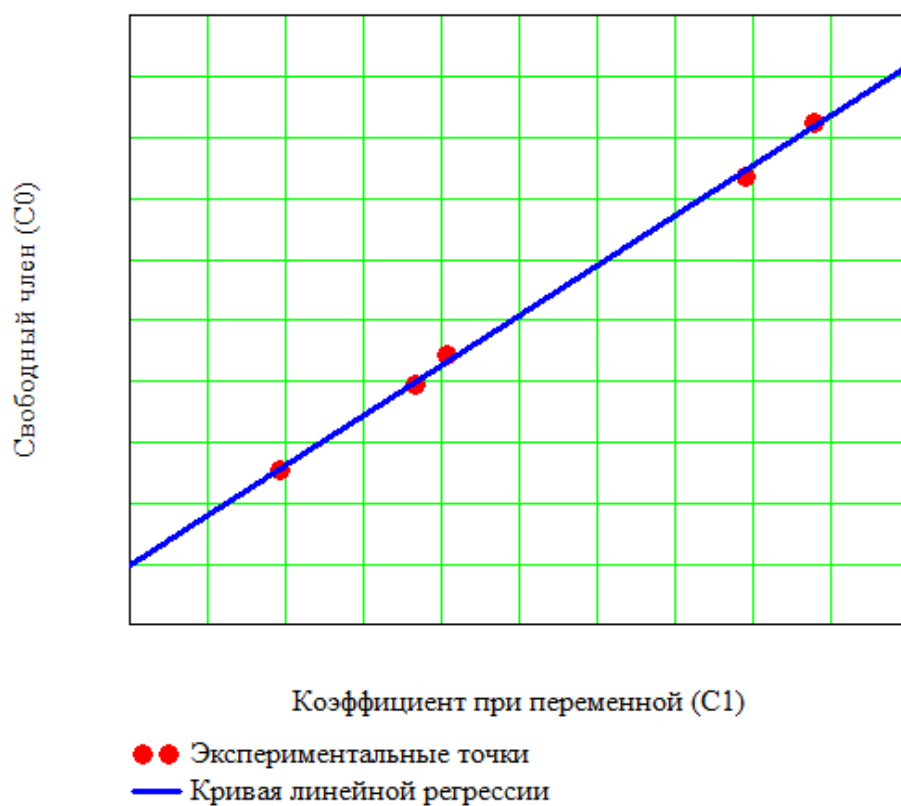


Рисунок 7 – Зависимость $C_0 = C_0(C_1)$ для минимальных кривых МЦУ при $Re = 0,5$

Результаты статистической обработки приведены в таблице 2.

Результаты обработки взаимосвязи $C_0 = C_0(C_1)$ между коэффициентами кривых МЦУ

Параметры	Вариант взаимосвязи			
	$R_\varepsilon = 0$ Средняя	$R_\varepsilon = 0$ Минимальная	$R_\varepsilon = 0,5$ Средняя	$R_\varepsilon = 0,5$ Минимальная
a	2,42242	2,51231	2,19952	2,28408
b	6,14745	6,18658	4,52734	4,40424
r_{xy}	0,9929	0,98413	0,99875	0,99942

Из таблицы 2 видно, что для всех кривых МЦУ получены линейные зависимости между коэффициентами данных кривых с коэффициентами корреляции r_{xy} выше 98 %.

Из рисунков 4-7 и таблицы 2 видно, что между коэффициентами кривых МЦУ присутствует взаимосвязь близкая к линейной. А из этого следует, что для кривых МЦУ существует фокусная точка. Для выяснения физической природы такой взаимосвязи и более точного ее математического описания нужны дополнительные исследования.

Таким образом, коэффициенты кривых МЦУ имеют выраженную зависимость, как от температуры, так и от асимметрии цикла, при этом они также взаимосвязаны между собой.

Данные зависимости необходимо учитывать при расчетах долговечности по кривым МЦУ.

Сравнение зависимостей для коэффициентов кривых МЦУ

В данном разделе проведено сравнение взаимосвязей между коэффициентами кривых МЦУ, полученных в предыдущем разделе, с целью установить, что различие в коэффициентах кривых для разных асимметрий цикла не является случайным.

Сравнение проведено по методике, описанной в разделе сравнения линейных регрессий экспериментальных данных, результаты приведены в таблице 3.

Сравнение зависимостей для коэффициентов кривых МЦУ

Параметры	Тип кривых	
	Средние	Минимальные
α	0,05	
S_c	1,31035	6,38306
$f(1-\frac{\alpha}{2}; n_1-2; n_2-2)$	15,43918	15,43918
t_a	1,29923	1,05267
$t(1-\frac{\alpha}{2}; n_1+n_2-4)$	2,44691	2,44691
t_b	0,15992	0,24549
$t(1-\frac{\alpha}{2}; n_1+n_2-3)$	2,36462	2,36462

Из таблицы 3 видно, что гипотеза о равенстве кривых регрессий при разных коэффициентах асимметрии цикла для разных вариантов осреднения не противоречит экспериментальным данным. Поэтому следует объединить полученные выборки и найти общие кривые.

В качестве заключения в данном разделе вводится следующая гипотеза: связь между коэффициентами кривых МЦУ $C_0 = a \cdot C_1 + b$; является характеристикой материала и не зависит от температуры и асимметрии цикла нагружения.

Построение общей зависимости для коэффициентов кривых МЦУ

Результаты статистической обработки объединенных опытных данных приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты обработки объединенных опытных данных

Параметры	Вариант взаимосвязи	
	Средние	Минимальные
a	2,17878	2,23079
b	4,49778	4,24108
r_{xy}	0,99579	0,99248

Объединенные прямые, описывающие взаимосвязь между коэффициентами кривых МЦУ, для средних и минимальных кривых приведены в таблице 5 и на рисунках 8-9.

Таблица 5

Взаимосвязи между коэффициентами кривых МЦУ

Осреднение	Уравнение
Среднее	$C_0 = 2,1788 \cdot C_1 + 4,4978$
Минимальное	$C_0 = 2,2308 \cdot C_1 + 4,2411$

Остается открытым вопрос о том, какими физическими процессами обосновано такое поведение кривых МЦУ, что между их коэффициентами в двойных логарифмических координатах наблюдается взаимосвязь, близкая к линейной.

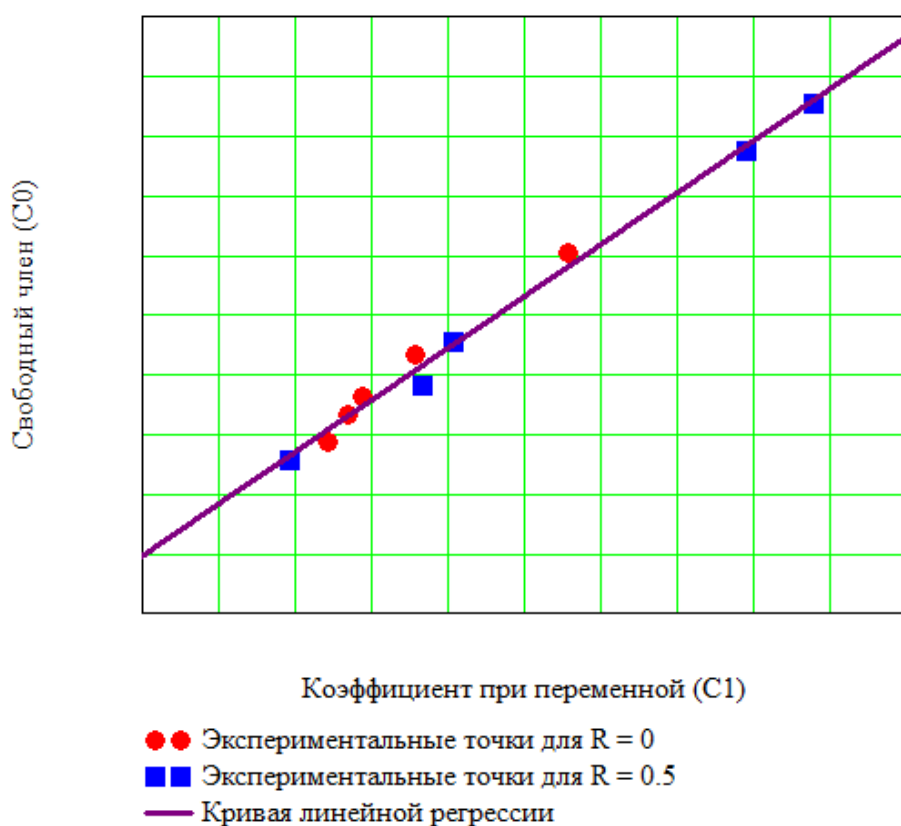


Рисунок 8 – Зависимость между коэффициентами средних кривых МЦУ

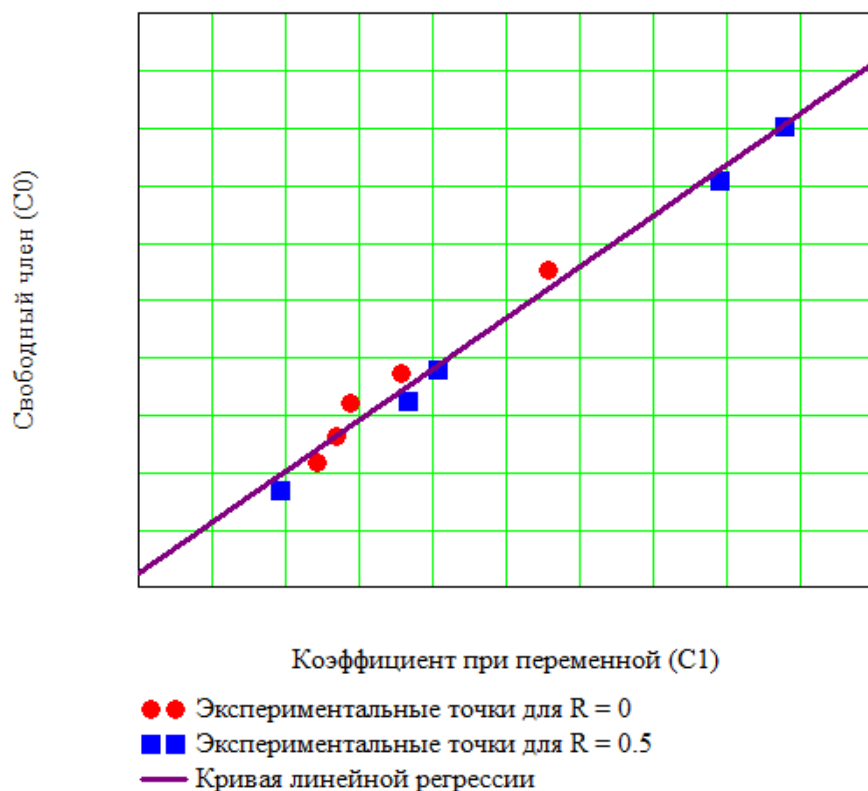


Рисунок 9 – Зависимость между коэффициентами минимальных кривых МЦУ

Построение фокусной точки

В разделе, посвященном анализу коэффициентов отмечено, что для кривых МЦУ материала ЭП741НП должна существовать фокусная точка.

В данном разделе описывается построение фокусной точки для пересекающихся прямых.

Пусть имеется семейство прямых, описываемых формулой

$$N = a \cdot \varepsilon + b; \quad (12)$$

И пусть между коэффициентами прямых есть взаимосвязь

$$b = k \cdot a + d; \quad (13)$$

Теперь найдем точку пересечения ε_ϕ двух прямых семейства (12)

$$a_1 \cdot \varepsilon_\phi + b_1 = a_2 \cdot \varepsilon_\phi + b_2;$$

тогда ε_ϕ будет

$$\varepsilon_\phi = \frac{(b_1 - b_2)}{(a_2 - a_1)};$$

Поскольку между коэффициентами семейства прямых (12) есть взаимосвязь (13), получаем

$$\varepsilon_{\phi} = \frac{(k \cdot a_1 + d - k \cdot a_2 - d)}{(a_2 - a_1)} = -k \frac{(a_2 - a_1)}{(a_2 - a_1)} = -k;$$

то есть

$$\varepsilon_{\phi} = -k; \quad (14)$$

Получаем, что если у коэффициентов семейства прямых (12) есть взаимосвязь (13), то все прямые семейства пересекаются в одной точке с абсциссой (14).

Поскольку взаимосвязь (12) является статистической, то кривые МЦУ будут пересекаться не строго в точке ε_{ϕ} , а в некотором доверительном интервале, размер которого будет зависеть от доверительной вероятности.

Заключение

В статье проведено сравнение кривых малоциклового усталости при разных температурах для разных асимметрий цикла нагружения. Показано, что с ростом температуры влияние коэффициента асимметрии цикла на долговечность для материала ЭП741НП уменьшается.

Коэффициенты кривых имеют выраженную зависимость, как от температуры, так и от асимметрии цикла.

Между коэффициентами кривых малоциклового усталости при переменной и свободными коэффициентами присутствует взаимосвязь близкая к линейной. А из этого следует, что для них существует фокусная точка. Для выяснения физической природы такой взаимосвязи и более точного ее математического описания нужны дополнительные исследования.

Показано, что зависимости между коэффициентами кривых малоциклового усталости для разных асимметрий цикла статистически идентичны. В связи с этим введена гипотеза о том, что связь между коэффициентами кривых является характеристикой материала и не зависит от температуры и асимметрии цикла нагружения.

Проведено построение фокусной точки для пересекающихся прямых, имеющих линейную взаимосвязь между коэффициентами. Отмечено, что, так как взаимосвязь между коэффициентами является статистической, то кривые

малоцикловой усталости будут пересекаться не строго в фокусной точке, а в некотором доверительном интервале, размер которого будет зависеть от доверительной вероятности.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Зарецкий М. В., Сидоренко А. С. Оценка показателей долговечности конструкций авиационного изделия при действии случайных нагрузок // Труды МАИ. 2013. № 70: <https://trudymai.ru/published.php?ID=44479>.
2. Полоник Е. Н., Суренский Е. А., Федотов А. А. Автоматизация расчетов усталостной долговечности элементов авиаконструкций с геометрическими концентраторами напряжений // Труды МАИ. 2016. № 86: <https://trudymai.ru/published.php?ID=67799>
3. Письмаров А. В. К вопросу прогнозирования пределов выносливости резьбовых деталей с поверхностным упрочнением // Труды МАИ. 2023. № 129: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173003>
4. Письмаров А. В., Кирпичёв В. А., Сазанов В. П. Прогнозирование сопротивления усталости резьбовых соединений // Труды МАИ. 2022. № 124: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167004>
5. Канашин И. В., Григорьева А. Л., Хромов А. И., Григорьев Я. Ю. Малоцикловое нагружение плоского образца с непрерывным полем скоростей перемещений при учете условия сжимаемости // Труды МАИ. 2023. № 130: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174606>
6. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. В двух книгах. Кн. 1 – Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2010. – 611 с.

7. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. В двух книгах. Кн. 2 – Рыбинск: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2011. – 496 с.
8. Сиротин Н. Н. Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий. Книга 1. / Н. Н. Сиротин, А. С. Новиков, А. Г. Пайкин, А. Н. Сиротин – М.: Наука, 2011. – 1087 с.
9. Сиротин Н. Н. Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий. Книга 2. / Н. Н. Сиротин, Е. Ю. Марчуков, А. С. Новиков, А. Г. Пайкин, А. Н. Сиротин, В. Г. Нестеренко – М.: Наука, 2012. – 431 с.
10. Сиротин Н. Н. Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий. Книга 3. / Сиротин Н. Н., Марчуков Е.Ю., Сиротин А.Н., Агульник А. Б. – М.: Наука, 2012. – 616 с.
11. Гогаев Г. П., Немцев Д. В. Исследование влияния полетных условий на повреждаемость диска турбины высокого давления высокоманевренного летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 134-142.
12. Гогаев Г. П., Немцев Д. В., Шубин И. А., Богданов М. А. Исследование влияния полетных условий на повреждаемость сварного блока дисков 1-3 ступени КВД высокоманевренного ЛА // Насосы. Турбины. Системы. 2018. № 3. С. 55-61.
13. Spodniak M., Klimko M., Hocko M., Zitek P. Low cycle fatigue numerical estimation of a high pressure turbine disc for the AL31-F jet engine // EFM 2016, 2017, pp. 1-5.
14. Karimbaev K. D., Servetnik A. N. Low-Cycle Fatigue Calculation of Gas Turbine Engine Disks under Flight Cycle Conditions // Проблемы прочности. 2009. № 1. С. 129-133.

15. Голубовский Е. Р., Артамонов М. А., Волков М. Е., Эммаусский Н. М., Шibaев С. А. Усталость монокристаллов жаропрочного никелевого сплава ВЖМ-5 при высоких температурах // Технология легких сплавов. 2016. № 3. С. 83-88.
16. Кочерова Е. Е. Сравнительный анализ методик оценки малоциклового усталости деталей газотурбинного двигателя на примере дефлектора диска турбины высокого давления // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. № 1. С. 61-71.
17. ГОСТ 25.502-79 Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость.
18. ASTM E606. Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing.
19. Браунли К. А. Статистическая теория и методология в науке и технике. – М.: Наука, 1977. – 408 с.
20. Воскобойников Ю. Е. Регрессионный анализ данных в пакете Mathcad: Учебное пособие – СПб: Лань, 2011. – 224 с.

References

1. Zareckiy M. V., Sidorenko A. S. *Trudi MAI*, 2013, no 70. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=44479>
2. Polonil E. N., Surenskiy E. A., Fedotov A. A. *Trudi MAI*, 2016. no. 86. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=67799>
3. Pis'marov A. V. *Trudi MAI*, 2023. no. 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=72589>.
4. Pis'marov A. V., Kirpichev V. A., Sazanov V. P. *Trudi MAI*, 2022. no. 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173003>
5. Kanashin I. V., Grigor'eva A. L., Hromov A. I., Grigor'ev Ya. I. *Trudi MAI*, 2023. no. 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174606>
6. Gezov L. B. *Materiali o prochnost' detaley gazovih turbine. V dvuh knigah, Ribinsk, Izdatel'skiy dom "Gazoturbinnie technologii"*, vol. 1, 611 p.
7. Gezov L. B. *Materiali o prochnost' detaley gazovih turbine. V dvuh knigah, Ribinsk, Izdatel'skiy dom "Gazoturbinnie technologii"*, vol. 2, 496 p.

8. Sirotin N. N. *Osnovi konstruirovaniy, proizvodstva I expluatacii gazotubinnih dvigateley I energeticheskikh ustanovok v sisteme CALS technologiy*, Moskva, Nauka, vol. 1, p. 1087.
9. Sirotin N. N. *Osnovi konstruirovaniy, proizvodstva I expluatacii gazotubinnih dvigateley I energeticheskikh ustanovok v sisteme CALS technologiy*, Moskva, Nauka, vol. 2, p. 431.
10. Sirotin N. N. *Osnovi konstruirovaniy, proizvodstva I expluatacii gazotubinnih dvigateley I energeticheskikh ustanovok v sisteme CALS technologiy*, Moskva, Nauka, vol. 3, p. 616.
11. Gogaev G. P., Nemcev D. V. *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo institute*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 134-142.
12. Gogaev G. P., Nemcev D. V., Shubin I. A., Bogdanov M. A. *Nasosi. Turbini. Sistemi*, 2018, no. 3, pp. 55-61.
13. Spodniak M., Klimko M., Hocko M., Zitek P. *EFM 2016*, 2017, pp. 1-5.
14. Karimbaev K. D., Servetnik A. N. *Problemi prochnosti*, 2009, no. 1. pp. 129-133.
15. Golubovsky E. R., Artamonov M. A., Volkov M. E., Emmaussky N. M., Shibaev S. A. *Technologii legkih splavov*, 2016, no. 3, pp. 83-88.
16. Kocherova E. E. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskay tekhnika, technologiy i mashinostroenie*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 61-71.
17. *GOST 25.502-79 Metody mechanicheskikh ispitaniy metallov. Metody ispitaniy na ustalost'* (GOST 25.502-79 Strength analysis and testing in mechanic building. Methods of metals mechanical testing. Methods of fatigue testing) Moscow, Standarty, 1979.
18. ASTM E606. Standard Test Method for Strain-Controlled Fatigue Testing.
19. Braunly K. A. *Statisticheskay teoriya i metodologiya v nauke i technike*, Moskva, Nauka, 408 p.
20. Voskoboynikov U. E. *Regressionniy analiz danih v pakete Mathcad*, Saint-Petersburg, Lan', 224 p.

Информация об авторах

Александр Михайлович Крупенин, кандидат технических наук, ведущий конструктор ПАО «ОДК-УМПО» филиал «ОКБ им. А. Люльки», г. Москва, Россия; e-mail: Zeus-RUSS@yandex.ru

Information about the authors

Aleksandr M. Krupenin, Candidate of Technical Science, UMPO PJSC Branch, Lyulka Research and Design Bureau, Moscow, Russia; e-mail: Zeus-RUSS@yandex.ru.

Получено 01 ноября 2025 ● Принято к публикации 01 июня 2026 ● Опубликовано 31 августа 2026
Received 01 November 2025 ● Accepted 01 June 2026 ● Published 31 August 2026
