

УДК 669.018.44:669.246

DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s4-103-108

М.С. Беляев¹, М.А. Горбовец¹**О РАЗРЫВЕ КРИВОЙ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ
ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА***

Рассмотрено сопротивление малоциклового усталости (МЦУ) деформированного никелевого жаропрочного сплава при воздействии таких факторов, как температура испытания, чувствительность к концентрации напряжений, база испытания. При температуре 650°C в широком интервале долговечностей (10^3 – $5 \cdot 10^6$ циклов) кривая МЦУ жаропрочного сплава при испытании гладких образцов аппроксимируется прямой линией, а при испытании образцов с надрезом – кривой с разрывом, что обосновано путем статистического анализа результатов испытаний.

Ключевые слова: малоцикловая усталость (МЦУ), обработка результатов испытаний, чувствительность к концентрации напряжений, база испытания, деформированный никелевый жаропрочный сплав.

The paper is focused on investigation of LCF resistance of wrought Ni-based superalloy. An influence of such factors as test temperature, number of cycles and stress concentration sensitivity on LCF resistance has been studied. Fatigue curve of the above alloy is approximated by straight line in $\lg\sigma$ – $\lg N$ diagram for unnotched specimens and by discontinuous curve – for notched specimens at 650°C and number of cycles within 10^3 – $5 \cdot 10^6$. It was based on math statistics analysis of test results.

Keywords: low cycle fatigue (LCF), processing of test results, stress concentration sensitivity, number of cycles, wrought Ni-based superalloy.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

*В работе принимала участие Т.И. Комарова.

Введение

Исследование сопротивления малоциклового усталости (МЦУ) проводят для конструкционных материалов, подвергающихся в процессе эксплуатации усталостному нагружению. В качестве характеристики прочности материала МЦУ востребована с различными целями – при разработке материала, при квалификации серийно производимого сплава, при расчетах деталей конструкции на прочность и ресурс [1–7]. Для определения характеристик, как правило, проводят испытания партии образцов в некотором интервале долговечностей и строят кривую МЦУ по средним значениям [8, 9].

Известно, что при определенных условиях испытаний металлических материалов наблюдается разрыв кривых много- и малоциклового усталости [10]. Это явление существенно влияет на изменение величины предела усталости в зависимости от базы испытания. Разрыв кривой усталости следует рассматривать в связи с условиями испытаний и возможными изменениями механизма и характера разрушения при изменении базы испытания, коэффициента асимметрии R и других факторов. Изменение структуры материала, которое происходит в процессе испытаний на усталость жаропрочных материалов на больших базах испытания при совместном воздействии напряжения и высоких температур [11–14], также следует

рассматривать в качестве важного влияющего фактора.

Материалы и методы

В данной работе рассмотрено сопротивление МЦУ деформированного никелевого жаропрочного сплава при воздействии таких факторов, как температура испытания, чувствительность к концентрации напряжений, база испытания. Указанные материалы нашли применение в деталях ротора авиационных газотурбинных двигателей. Характеристики МЦУ относят к числу основных характеристик прочности жаропрочных сплавов, которые используют в качестве материала дисков турбины.

Деформированный никелевый жаропрочный сплав типа ВЖ175 относится к сложнолегированным материалам, состав которых обеспечивает высокую стабильность структуры в течение длительной эксплуатации. Они обладают гетерофазной структурой, которую образуют γ -твердый раствор, имеющий ГЦК решетку, и когерентная γ' -фаза – соединение на основе Ni_3Al . Содержание γ' -фазы в современных сплавах превышает 50%. Жаропрочные никелевые сплавы являются дисперсионно-твердеющими. В процессе производства эти материалы проходят сложный технологический процесс, включающий выплавку и переплав в вакуумной печи, а затем обработку давле-

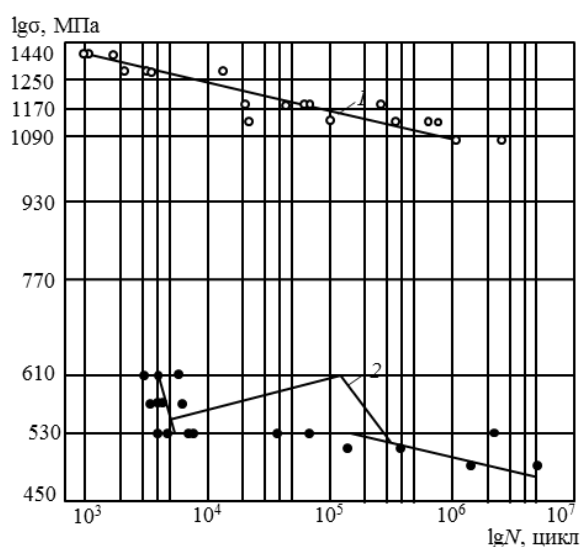


Рис. 1. Результаты испытаний на МЦУ жаропрочного никелевого сплава при температуре 650°C: 1 – гладкие образцы (линейная аппроксимация); 2 – образцы с надрезом (аппроксимация – разрыв кривой усталости)

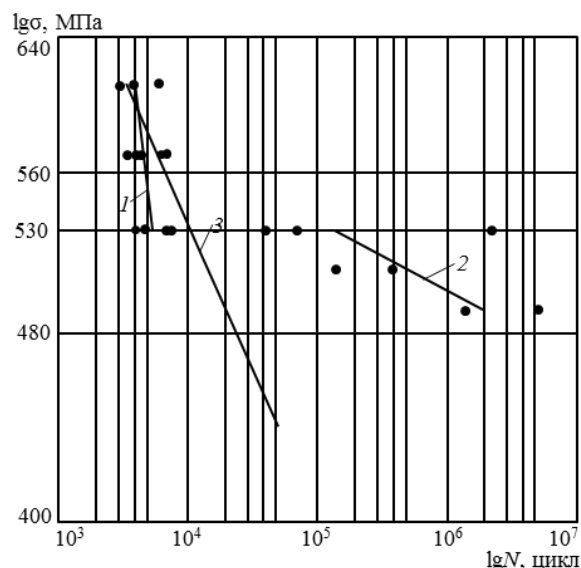


Рис. 2. Различные аппроксимации результатов испытаний образцов с надрезом: 1 – левый участок кривой усталости с разрывом; 2 – правый участок кривой усталости с разрывом; 3 – линейная аппроксимация результатов испытаний в ограниченном интервале долговечностей ($3 \cdot 10^3$ – $7 \cdot 10^4$ циклов) и прогнозирование до базы $5 \cdot 10^4$ циклов

нием и термическую обработку [15–22]. Сплав типа ВЖ175 характеризуется следующими основными механическими свойствами: при комнатной температуре пределы прочности и текучести при растяжении составляют соответственно 1600 и 1190 МПа, относительное удлинение 14%. Предел длительной прочности при температуре 650°C на базе испытания 100 ч равен 1050 МПа.

В данной работе на МЦУ испытаны гладкие образцы с цилиндрической рабочей частью $\varnothing 5$ мм, а также образцы с надрезом с минимальным диаметром рабочей части 5 мм, радиусом в вершине надреза 0,25 мм; теоретический коэффициент концентрации напряжений – $\alpha_\sigma=3,35$. Испытания проведены в условиях циклического растяжения при коэффициенте асимметрии $R=0,1$, частоте нагружения 1 Гц, контролируемый параметр – амплитуда нагрузки. Температура испытания составляла 650°C. Результаты испытаний представлены и анализируются в двойной логарифмической системе координат $\lg\sigma$ – $\lg N$ (рис. 1 и 2).

Существенная особенность проведенных испытаний исследуемого сплава на МЦУ заключается в том, что они выполнены в очень широком интервале долговечностей: $3 \cdot 10^3$ – $5 \cdot 10^6$ циклов. Большое количество образцов испытано в интервале долговечностей 10^5 – $5 \cdot 10^6$ циклов, что значительно превышает долговечность испытаний на малоцикловую усталость ($5 \cdot 10^4$ циклов), приведенную в ГОСТ 25.502 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость».

Результаты

На МЦУ испытаны до разрушения 19 гладких и 18 образцов с надрезом. Анализ разброса значений экспериментальных результатов испытаний гладких образцов показывает, что при понижении уровня напряжения происходит плавное повышение числа циклов до разрушения (см. рис. 1).

При испытании образцов с надрезом наблюдается иной характер разброса значений экспериментальных результатов. Одиннадцать образцов для испытаний в области высоких и среднего для данной выборки значений напряжений разрушены в области малых долговечностей: $(3$ – $7) \cdot 10^3$ циклов. Пять образцов для испытаний при среднем и низких значениях напряжений разрушены в области высоких долговечностей: 10^5 – $5 \cdot 10^6$ циклов. Еще два образца для испытаний при среднем значении напряжения разрушены при долговечностях $(4$ – $7) \cdot 10^4$ циклов, которые в ~ 10 раз больше, чем в области малых долговечностей.

Анализ разброса результатов позволяет предположить, что при испытании гладких образцов наблюдается линейная зависимость логарифма числа циклов до разрушения от логарифма напряжения, а при испытании образцов с надрезом имеется разрыв кривой усталости. Для корректной обработки и анализа имеющихся результатов испытаний на МЦУ следует воспользоваться статистическими методами.

При обработке результатов испытаний на усталость целесообразно использовать линейную за-

висимость между напряжением и числом циклов до разрушения. Уравнение кривой усталости часто принимают в виде $\sigma^m N = \text{const}$, которое после логарифмирования приобретает вид $\lg N = a + b \lg \sigma$ и выражается прямой линией в системе двойных логарифмических координат. В данном случае логарифм напряжения ($\lg \sigma$) или непосредственно напряжение (σ) является независимой переменной, логарифм числа циклов до разрушения ($\lg N$) – случайной величиной. Процедуры обработки включают все экспериментальные результаты, т. е. учитывают разброс значений, присущий при испытании на усталость. Применение методов регрессионного анализа позволяет определить, кроме средних значений, ряд важнейших статистических характеристик, включая значения среднего квадратического отклонения (СКО) S и дисперсии S^2 логарифма числа циклов до разрушения – $\lg N$ [8, 23, 24]. Для проведения статистического анализа результатов испытаний на малоцикловую усталость желательно, чтобы на каждом уровне напряжения было испытано не менее 5 образцов, однако осуществить такое условие не удалось.

Для проверки корректности линейной аппроксимации результатов испытаний на МЦУ гладких образцов и образцов с надрезом применен F -критерий:

$$F = \frac{S_2^2}{S_1^2}, \quad (1)$$

где S_1^2 – осредненная условная дисперсия $\lg N$; S_2^2 – дисперсия $\lg N$ относительно эмпирической линии регрессии.

Дисперсия S_1^2 может быть определена только при условии, что соблюдается однородность дисперсий, найденных для различных значений независимой переменной, т. е. для различных значений напряжений в имеющейся выборке. Однородность условных дисперсий может быть подтверждена с помощью критерия Бартлета – χ^2 [8]:

$$\chi^2 = \frac{2,3026}{c} \left[\left(\sum_{i=1}^m n_i - m \right) \lg S^2 - \sum_{i=1}^m (n_i - 1) \lg S_i^2 \right], \quad (2)$$

где
$$c = 1 + \frac{1}{3(m-1)} \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{\sum_{i=1}^m n_i - m} \right);$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) S_i^2}{\sum_{i=1}^m n_i - m};$$

n_i – число образцов, испытанных на i -м уровне напряжения; $i=1 \div m$; m – число уровней напряжения с.

В данной работе испытания гладких образцов проведены на пяти уровнях напряжения. На отдельном уровне количество испытанных образцов составляет от двух до пяти. Выполнены расчеты дисперсий S_i^2 логарифма числа циклов на каждом уровне напряжения, а также других необходимых величин и определено значение критерия Бартлета. Для выборки гладких образцов значение критерия Бартлета – $\chi^2=4,00$, тогда как квантиль χ^2 распределения для вероятности 5% и числа степеней свободы $k=4$ равен 9,49. Поскольку рассчитанное значение критерия Бартлета меньше, чем табличное значение χ^2 распределения, гипотеза об однородности условных дисперсий для имеющейся выборки образцов принимается. В таком случае усредненную условную дисперсию S_1^2 можно определить, используя соотношение

$$S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^m n_i - m}, \quad (3)$$

где \bar{y}_i – среднее значение $\lg N$ на i -м уровне напряжения; y_{ij} – экспериментальное значение $\lg N_j$ на i -м уровне напряжения; $j=1 \div n_i$.

Рассчитанное значение S_1^2 оказалось равно 0,201.

Далее для аппроксимации результатов испытаний использовали метод линейного регрессионного анализа, задавая эмпирическую линию регрессии в форме зависимости $\lg N = a + b \lg \sigma$, значения коэффициентов a и b определяли, используя метод наименьших квадратов. В численной форме уравнение линии регрессии имеет вид $\lg N = 109,34 \lg \sigma$, значение дисперсии S_2^2 относительно эмпирической линии регрессии – $S_2^2 = 0,170$. Значение F -критерия составляет $F = S_2^2 / S_1^2 = 0,846$. Критическое значение для 5% уровня значимости величины F и соответствующего числа степеней свободы – $F = 8,71$. Поскольку значение F -критерия для имеющейся выборки меньше критического значения, линейную аппроксимацию результатов испытаний гладких образцов следует считать обоснованной.

Испытания образцов с надрезом проведены на пяти уровнях напряжения σ , причем на четырех уровнях испытано от двух до четырех образцов, а на одном уровне ($\sigma = 530$ МПа) 7 образцов. Для имеющейся выборки рассчитанное значение критерия Бартлета – $\chi^2 = 12,51$, тогда как квантиль χ^2 распределения для вероятности 5% и числа степеней свободы $k=4$ равен 9,49. Поскольку рассчитанное значение критерия Бартлета превышает критическое значение χ^2 распределения, гипотеза об однородности условных дисперсий для имеющейся выборки образцов отвергается. Вследствие этого не может быть определена дисперсия S_1^2 в формуле (1) и применение F -критерия невозможно.

но. Таким образом, подтверждается высказанное выше предположение о необоснованности применения метода линейного регрессионного анализа к аппроксимации результатов испытаний всей выборки образцов с надрезом в количестве 18 шт.

Анализ результатов испытаний позволяет предложить для описания схему в виде двух линейных участков, между которыми наблюдается разрыв кривой малоциклового усталости (см. рис. 2). Один линейный участок включает 11 образцов и относится к области малых долговечностей $((3-7) \cdot 10^3$ циклов). Второй линейный участок включает 7 образцов и относится к области высоких долговечностей $(4 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$ циклов). В обоих случаях подтверждена однородность дисперсий по критерию Бартлета и возможность линейной аппроксимации результатов с применением F -критерия. На первом участке средняя линия предела выносливости имеет высокий угол наклона к оси ординат, угловой коэффициент регрессии $b = -2,05$; на втором участке средняя линия предела выносливости имеет малый угол наклона к оси ординат, угловой коэффициент регрессии $b = -33,0$.

Обнаруженный разрыв кривой МЦУ при испытании образцов с надрезом объясняется рядом причин. Значения напряжений в вершине надреза и прилегающих объемах материала значительно превышают предел текучести материала вследствие реализации эффекта концентрации напряжений ($\alpha_\sigma = 3,35$). В начальный период испытаний в условиях действия высоких напряжений интенсивно развиваются процессы микропластического деформирования и разрушения. Образование микротрещин происходит быстро, формируется и растет макротрещина. Разрушение образцов происходит при малых долговечностях $((3-7) \cdot 10^3$ циклов).

Вместе с тем большую роль играет процесс микропластического деформирования, который развивается в условиях действия высокой температуры испытания в высоконагруженных объемах материала. При увеличении числа циклов, т. е. длительности испытания, микромеханизмы циклического деформирования становятся более сложными и рассредоточенными, вследствие чего в процесс вовлекаются сравнительно большие объемы материала. Происходит снижение максимальных действующих напряжений в зоне концентрации и замедление продвижения трещины усталости. Этот процесс выступает как конкурирующий с процессом быстрого разрушения. Если он становится доминирующим, число циклов до разрушения значительно растет и достигает $5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$ циклов. То же происходит и при значениях напряжений меньше критического значения [10, 25].

Описанное явление разрыва кривой МЦУ никелевого жаропрочного сплава в условиях действия высокой температуры и эффекта концентрации напряжений объясняется реализацией различных механизмов разрушения. Один механизм ре-

ализуется в области малых долговечностей, другой – в области высоких. В данной работе для никелевого деформированного сплава типа ВЖ175, температуры испытания 650°C , цилиндрического образца с кольцевым надрезом и теоретическим коэффициентом концентрации напряжений $\alpha_\sigma = 3,35$ один механизм реализуется в интервале долговечностей $N = (3-7) \cdot 10^3$ циклов, другой механизм – в интервале $N = 5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$ циклов.

Во многих случаях линейная аппроксимация является обоснованной при условии, что испытания проводятся в пределах обычного интервала долговечностей $10^2 - 5 \cdot 10^4$ циклов. В этом случае реализация схемы с разрывом кривой МЦУ может не проявиться в полном объеме. Вместо семи образцов, как в данной работе, в области высоких долговечностей будет испытано один-два образца и применена линейная аппроксимация при обработке результатов. Поэтому целесообразно рассмотреть как меняются средние значения предела МЦУ и чувствительность к концентрации напряжений при использовании различных схем аппроксимации результатов испытаний образцов с надрезом (см. рис. 2).

Сравним средние значения пределов МЦУ, полученные двумя способами. Первый способ – линейная аппроксимация экспериментальных результатов, имеющихся в интервале долговечностей $3 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^4$ циклов, с использованием метода наименьших квадратов, т. е. определение уравнения, построение средней линии и определение предела МЦУ на заданной базе испытания. Здесь также выполнено прогнозирование средней линии МЦУ до базы $5 \cdot 10^4$ циклов. Второй способ – применение схемы с разрывом линии усталости для всего интервала долговечностей $3 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6$ циклов с использованием метода наименьших квадратов для каждого участка, т. е. для участков малых и больших долговечностей.

В таблице приведены средние значения предела МЦУ исследованного сплава, полученные после испытаний гладких образцов и образцов с надрезом.

Отметим, что при аппроксимации результатов испытаний образцов с надрезом по схеме «кривая МЦУ с разрывом» затруднительно однозначно определить величину предела усталости при долговечностях, попадающих в полосу разрыва. Рассчитав уравнения средних линий регрессии, получаем, что значение предела усталости $\sigma = 530$ МПа соответствует одновременно двум базам испытания $N_1 = 5,4 \cdot 10^3$ циклов (левый участок) и $N_2 = 1,4 \cdot 10^5$ циклов (правый участок). При составлении таблицы предполагали, что значение предела усталости $\sigma = 530$ МПа можно распространить на весь интервал долговечностей $N = 5,4 \cdot 10^3 - 1,4 \cdot 10^5$ циклов. Отметим также, что разброс долговечностей в некоторой переходной области между двумя участками кривой МЦУ нуждается в более подробном исследовании.

**Пределы МЦУ никелевого жаропрочного сплава типа ВЖ175 в зависимости от схемы
аппроксимации результатов испытаний**

База испытания N , цикл	Напряжение, МПа			Эффективный коэффициент концентрации напряжений K_σ	
	для гладких образцов при линейной аппроксимации	для образцов с надрезом		при линейной аппроксимации	при кривой МЦУ с разрывом
		при линейной аппроксимации в интервале $N=3 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^4$ циклов	при кривой МЦУ с разрывом		
10^4	1240	530	530	2,34	2,34
$5 \cdot 10^4$	1180	440 (прогноз)	530	2,68	2,23
10^5	1160	—	530	—	2,19
10^6	1080	—	500	—	2,16

Приведенные данные показывают, что если область испытаний образцов с надрезом ограничена интервалом $3 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^4$ циклов, то явление разрыва кривой МЦУ не проявляется. Достоверное определение предела МЦУ возможно на базе испытания, не превышающей 10^4 циклов. При этом наблюдается одно и то же значение предела МЦУ, определенное для выборки в области малых долговечностей (13 образцов) и для полной выборки (18 образцов), т. е. по схеме «разрыв кривой МЦУ». Для выборки ограниченного объема прогнозирование предела МЦУ в области долговечностей $>10^4$ циклов не допускается. Данные, приведенные в таблице для базы испытания $5 \cdot 10^4$ циклов, показывают, что прогнозирование предела МЦУ приводит к существенной ошибке в определении предела МЦУ.

Заключение

Выполненная работа позволяет сделать следующие выводы:

– при проведении испытаний на малоцикловую усталость (МЦУ) гладких образцов или образцов

с надрезом в условиях контроля амплитуды нагрузки деформированного жаропрочного никелевого сплава типа ВЖ175 при температуре 650°C в широком интервале долговечностей $10^3 - 5 \cdot 10^6$ циклов форма кривой МЦУ зависит от типа образца – гладкий или с надрезом;

– результаты испытаний гладких образцов аппроксимируются одной прямой линией во всем интервале долговечностей, а результаты испытаний образцов с надрезом аппроксимируются кривой МЦУ с разрывом, что обосновано статистическим анализом результатов испытаний;

– при испытании образцов с надрезом кривая МЦУ реализуется в следующей форме – линейный участок в интервале малых долговечностей $3 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^3$ циклов, разрыв кривой, линейный участок в интервале больших долговечностей $4 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$ циклов;

– по результатам испытаний образцов с надрезом прогнозирование средней линии МЦУ, полученной в области малых долговечностей, в области более высоких долговечностей не допускается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биргер И.А., Балашов Б.Ф., Дульнев Р.А. и др. Конструкционная прочность материалов и деталей газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение. 1981. 222 с.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Иноземцев А.А., Ратчиев А.М., Нихамкин М.Ш. и др. Малоцикловая усталость и циклическая трещиностойкость никелевого сплава при нагружении, характерном для дисков турбин //Тяжелое машиностроение. 2011. №4. С. 30–33.
4. Schijve J. Fatigue of structures and materials. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2009. 185 с.
5. Каблов Е.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г. Создание современных жаропрочных материалов и технологий их производства для авиационного двигателестроения //Крылья Родины. 2012. №3–4. С. 34.
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С., Сидоров В.В. Приоритетные направления развития технологий производства жаропрочных материалов для авиационного двигателестроения //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2013. №3. С. 47–54.
7. Способ получения изделия из деформируемого жаропрочного никелевого сплава: пат. 2387733 Рос. Федерация; опубл. 31.03.2009.
8. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. М.: Машиностроение. 2005. 400 с.
9. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопrotивление усталости металлов и сплавов: Справочник. Ч. 1. Киев: Наукова думка. 1987. 510 с.
10. Терентьев В.Ф. Усталость металлических материалов. М.: Наука. 2003. 254 с.
11. Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Чабина Е.Б., Филонова Е.В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 25–30.
12. Бакрадзе М.М., Овсепян С.В., Шугаев С.А., Летников М.Н. Влияние режимов закалки на структуру и свойства штамповок дисков из жаропрочного никелевого сплава //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 25–30.

- левого сплава ЭК151-ИД //Труды ВИАМ. 2013. №9. Ст. 01 (viam-works.ru).
13. Reed C.R. The superalloys – fundamentals and applications. Cambridge: Cambridge University Press. 2006. 372 p.
 14. Carroll L.J., Cabet C., Carroll M.C., Wright R.N. The Development of Microstructural Damage During Creep-Fatigue of a Nickel Alloy //Int. J. Fatigue. 2013. V. 47. P. 115–125.
 15. Ломберг Б.С., Овсяян С.В., Бакрадзе М.М. и др. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.
 16. Овсяян С.В., Ломберг Б.С., Бакрадзе М.М., Летников М.Н. Термическая обработка деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 122–130.
 17. Ломберг Б.С., Овсяян С.В., Бакрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 3–8.
 18. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Каблов Д.Е. Особенности структуры и жаропрочных свойств монокристаллов <001> высокорениевого никелевого жаропрочного сплава, полученного в условиях высокоградиентной направленной кристаллизации //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 25–31.
 19. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Бронфин М.Б., Алексеев А.А. Особенности монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением //Металлы. 2006. №5. С. 47–57.
 20. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.
 21. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для лопаток с направленной и монокристаллической структурой (часть II) //Материаловедение. 1997. №5. С. 14–16.
 22. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).
 23. Беляев М.С., Горбовец М.А., Комарова Т.И. Способ испытаний и расчетное определение предела выносливости для горизонтального участка кривой усталости //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 50–55.
 24. Wright J.K., Carroll L.J., Simpson J.A. et al. Low Cycle Fatigue of Alloy 617 at 850°C and 950°C //J. of Eng. Mat. and Tech. 2013. V. 135. №7. P. 031005-1–031005-8.
 25. Усталость материалов при высокой температуре: Пер. с англ. /Под ред. Р.П. Скелтона М.: Металлургия. 1988. 343 с.