

**Андрианов И. К., Палков К. А., Чепурнова Е. К.**  
**I. K. Andrianov, K. A. Palkov, E. K. Chepurnova**

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ  
В КАЧЕСТВЕ МАТЕРИАЛОВ ЛОПАТОК ТУРБИН, НА ПРОЦЕСС РАСКРЫТИЯ  
ТРЕЩИН ОТРЫВА**

**EFFECT OF IMPURITIES IN HEAT RESISTANT NICKEL ALLOYS USED AS TURBINE  
BLADE MATERIALS ON THE CRACK OPENING PROCESS**

**Андрианов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Авиастроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Ivan K. Andrianov** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Aircraft Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Палков Константин Алексеевич** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: pka.knastu@gmail.com.

**Konstantin A. Palkov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: konstantin.palkov01@gmail.com.

**Чепурнова Елена Константиновна** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: el.chep@bk.ru.

**Elena K. Chepurnova** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: el.chep@bk.ru.

**Аннотация.** В работе проведено исследование влияния примесей в составе жаропрочных никелевых сплавов на процесс раскрытия трещины в пластине на примере задачи А. Гриффитса. Получены значения вертикальных перемещений берегов трещины. Проведена оценка способности различных никелевых сплавов сопротивляться развитию трещин при действии растягивающей нагрузки. Результаты исследования имеют важное значение для оценки трещиностойкости материалов лопаток газовых турбин.

**Summary.** The study of the influence of impurities in the composition of heat-resistant nickel alloys on the crack opening process in the plate on the example of the A. Griffiths problem has been carried out. The values of vertical displacements of the crack banks have been obtained. An estimation of the ability of various nickel alloys to resist crack development under tensile load has been carried out. The results of the research are important for estimating crack resistance of gas turbine blades materials.

**Ключевые слова:** трещина, никелевые сплавы, трещиностойкость, лопатка турбины.

**Key words:** crack, nickel alloys, crack resistance, turbine blade.

*Научное исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10114 «Разработка системы диагностирования повреждений турбинных лопаток и способа оптимизации теплоотвода в условиях термической усталости» (<https://rscf.ru/project/22-79-10114/>).*

УДК 629.7

**Введение.** На сегодняшний день активное развитие турбомашиностроения направлено не только в сторону увеличения рабочих температур с целью повышения КПД турбины, но и в сторону выбора жаропрочных сплавов, способных выдерживать многоциклическое нагружение в условиях высоких температур. Наибольшее распространение среди материалов лопаток турбин полу-

чили жаропрочные никелевые сплавы, способные выдерживать длительное силовое и тепловое воздействия [1]. При этом, несмотря на общую никелевую основу, механические свойства сплавов отличаются ввиду наличия примесей, соответственно, поведение данных сплавов при нагружении будет различаться. Особенно важен данный вопрос при исследовании дефектов лопаток турбин. Следует подчеркнуть, что от выбора материала лопаток зависит длительность безотказной эксплуатации газовой турбины. Выход из строя лопаток раньше эксплуатационного срока недопустим, поскольку может привести к большим временным и финансовым потерям.

Таким образом, *объектом исследования* являлись жаропрочные никелевые сплавы, используемые при изготовлении элементов газотурбинных двигателей, в частности лопаток турбин, работающих при повышенных температурах. *Предмет исследования* – влияние примесей никелевых сплавов на поведение материалов в процессе раскрытия трещин.

Согласно анализу литературных источников особенности распространения трещин рассмотрены в работах [2–6], вопросы диагностирования дефектов исследованы в трудах [7–13]. Проблемы расчёта напряжённо-деформированного состояния в окрестности трещины решались в работах [14; 15]. Зарубежные исследования в области жаропрочных никелевых сплавов проведены в работах [16–18], вопросы состава никелевых сплавов в качестве материалов лопаток турбин исследованы в трудах [19; 20]. Следует отметить, что во многих работах, в частности в области материаловедения, как правило, оценивается влияние примесей на процесс трещинообразования, зарождения дефектов. В данном же исследовании предложено оценить влияние примесей на процесс развития уже имеющейся трещины, что обуславливает *новизну работы* в рамках исследований о трещиностойкости жаропрочных никелевых сплавов. *Актуальность исследования* обусловлена тем, что на сегодняшний день достаточно активно развиваются технологии диагностирования трещин в лопатках турбин, предлагаются методы повышения их тепловой защиты с целью снижения вероятности трещинообразования. Соответственно, важной представляется оценка влияния материала на процесс распространения трещин в никелевых сплавах.

*Цель работы* заключалась в оценке влияния примесей в составе жаропрочных никелевых сплавов на процесс раскрытия трещин в материале. В соответствии с целью работы были определены *задачи исследования*, а именно: провести статическую постановку задачи линейной теории упругости для пластины с трещиной; провести сравнительный анализ перемещений берегов трещины при действии растягивающей нагрузки для никелевых жаропрочных сплавов с различным содержанием примесей; оценить различия для каждого из рассматриваемых сплавов.

Для решения поставленных задач использовались *методы исследований* в области механики разрушений: применялся принцип суперпозиции, позволяющий рассмотреть действие нагрузки, приложенной по берегам трещины отрыва в пластине из изотропного упругого материала; для оценки перемещений и напряжений использовалась модель Л. Я. Леонова, В. В. Панасюка. Выбор в качестве постановки задачи растяжения пластины с трещиной обусловлен *практической значимостью исследования*, поскольку результаты работы могут быть использованы при оценке развития трещин в лопатках турбин, находящихся под воздействием растягивающей центробежной силы, в процессе эксплуатации.

**Материалы и методы исследования.** На основании анализа справочной информации о жаропрочных никелевых сплавах [13] была составлена табл. 1, отражающая средние значения двух основных компонентов примесей в сплавах ЭИ437А, ВЖ136, ЭК79, ЭП742, ЭП741, ЭИ698, ЭИ437БУ, помимо основы (никеля); название и процент содержания компонентов в сплаве, а также значения модулей упругости I рода  $E$  для температур: 20 °С, 650 °С. Данный выбор обусловлен тем, что при температуре 20 °С механические свойства представленных никелевых сплавов практически не отличаются, наибольшие различия наблюдаются при повышенных температурах. Кроме того, лопатки газовых турбин в процессе эксплуатации испытывают высокотемпературное нагружение.

Постановка задачи для плоского напряжённого состояния при растяжении пластины с трещиной [14] в области  $-l \leq x \leq l$ , где  $2l$  – длина трещины, представлена на рис. 1. Вертикальные

перемещения  $u$  и берегов трещины будем определять с помощью модели Л. Я. Леонова, В. В. Панасюка [15]:

$$u(x) = -\frac{1}{\pi E} \int_{-l}^l p(\xi) \Gamma(x, \xi) d\xi, \quad (1)$$

где  $\Gamma(x, \xi)$  – функция Грина:

$$\Gamma(x, \xi) = \ln \left( \frac{l^2 - x\xi - \sqrt{(l^2 - x^2)(l^2 - \xi^2)}}{l^2 - x\xi + \sqrt{(l^2 - x^2)(l^2 - \xi^2)}} \right).$$

Таблица 1

Примеси и механические свойства жаропрочных никелевых сплавов

Сплав	Средние значения примесей, %	Основные компоненты примесей (%)		$E$ , МПа, при $t = 20$ °С	$E$ , МПа, при $t = 650$ °С
		Cr	Ti		
ЭИ437А	25,8	Cr (20,5 %)	Ti (2,5 %)	$1,9 \cdot 10^5$	$1,52 \cdot 10^5$
ВЖ136	30,5	Cr (16,5 %)	Mo (4 %)	$2 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$
ЭК79	38,1	Co (13,7 %)	Cr (11 %)	$2 \cdot 10^5$	$1,7 \cdot 10^5$
ЭП742	38,9	Cr (14 %)	Co (10 %)	$2,1 \cdot 10^5$	$1,83 \cdot 10^5$
ЭП741	43,8	Co (15,7 %)	Cr (9 %)	$2 \cdot 10^5$	$1,74 \cdot 10^5$
ЭИ698	26,5	Cr (14,5 %)	Mo (3 %)	$2 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$
ЭИ437БУ	26,5	Cr (20,5 %)	Ti (2,8 %)	$2 \cdot 10^5$	$1,55 \cdot 10^5$

Нормальные напряжения в области вне трещины  $|x| > l$  вследствие действия поверхностной нагрузки  $p = p(x)$  определяются согласно [15]:

$$\sigma_y(x) = -\frac{1}{\pi \sqrt{x^2 - l^2}} \int_{-l}^l \frac{p(\xi) \sqrt{l^2 - \xi^2}}{(x - \xi)} d\xi, \quad x > l. \quad (2)$$

Коэффициент интенсивности напряжений для трещины отрыва определяется согласно [15]:

$$K_I = -\frac{1}{\pi l} \int_{-l}^l \frac{\sigma_y(x) \sqrt{l+x}}{(l-x)} dx. \quad (3)$$

**Результаты исследования.** На основании соотношений (1), (2) проведён расчёт задачи А. Гриффитса для трещины эллиптического типа с малой полуосью начального раскрытия  $h = 0,01$  мм в пластине длиной  $2l = 10$  мм для жаропрочных никелевых сплавов ЭИ437А, ВЖ136, ЭК79, ЭП742, ЭП741, ЭИ698, ЭИ437БУ (см. табл. 1). Пластина нагружена давлением:  $p = \sigma = 200$  МПа, что с практической стороны обусловлено возникающими растягивающими напряжениями в лопатках турбин от действия центробежных сил. Температурное условие:  $t = 650$  °С.

Нормальные напряжения  $\sigma_y$  вне трещины при  $|x| > l$ , вызванные действием давления  $\sigma$  на берегах трещины, представлены на рис. 2, согласно которому по мере приближения к вершине трещины напряжения возрастают, стремясь к бесконечности. Согласно (3) коэффициент интенсивности напряжений при заданных условиях задачи  $K_I = 25$  МПа  $\cdot$  м<sup>1/2</sup>, что меньше вязкости разрушения для данных сплавов, следовательно, ускоренного роста трещины наблюдаться в данной задаче не будет.

Результаты вертикальных перемещений берегов трещины при растягивающем нагружении для исследуемых сплавов представлены на рис. 3.

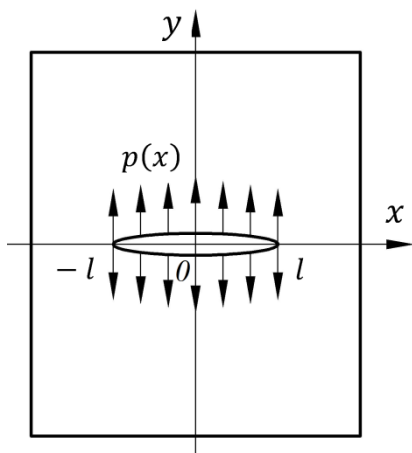


Рис. 1. Постановка задачи для пластины с трещиной

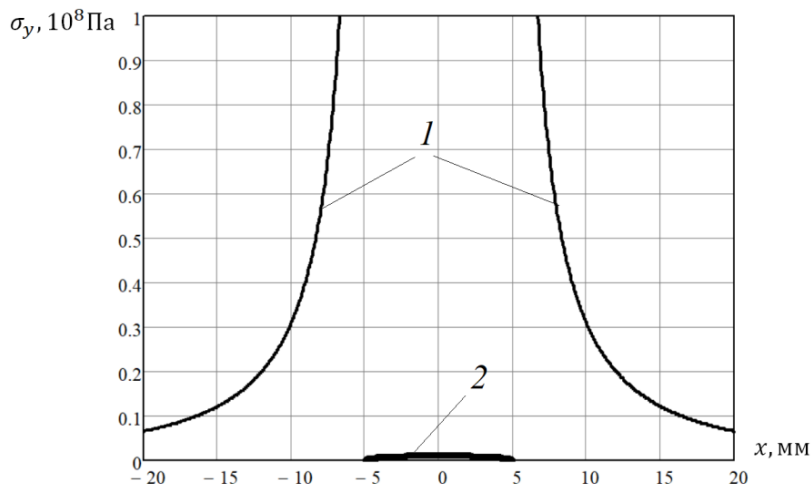


Рис. 2. Распределение нормальных напряжений вблизи трещины: 1 – напряжения  $\sigma_y$  при  $x < -l, x > l$ ; 2 – верхний берег трещины

**Обсуждение и заключение.** Согласно результатам перемещений верхнего берега трещины (см. рис. 3) наибольшие перемещения наблюдаются у сплавов ЭИ437А, ЭИ437БУ, ВЖ136, ЭИ698; данные сплавы содержат наименьшее количество примесей из исследуемых сплавов (см. табл. 1). В отношении сплавов ЭК79, ЭП742, ЭП741, содержащих, помимо никелевой основы, примеси других веществ более 35 %, в частности кобальта и хрома, отмечается наименьшее отклонение берегов трещины при растяжении. Наибольшее отличие в вертикальных перемещениях берегов трещин наблюдается у сплавов ЭИ437А ( $u|_{x=0} = 13,2$  мкм) и ЭП742 ( $u|_{x=0} = 10,9$  мкм) – оно составляет около 20 %. Отличием сплавов ЭК79, ЭП742, ЭП741, которые лучше всего сопротивляются раскрытию трещин, является одновременное наличие в составе сплавов двух компонентов: кобальта и хрома.

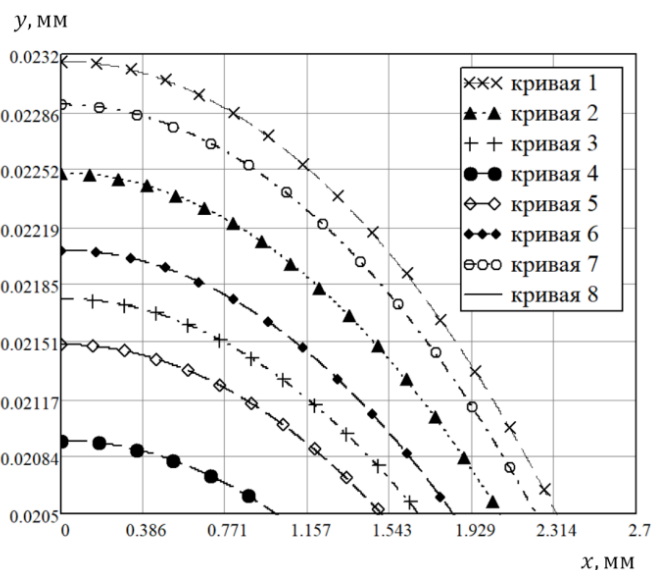
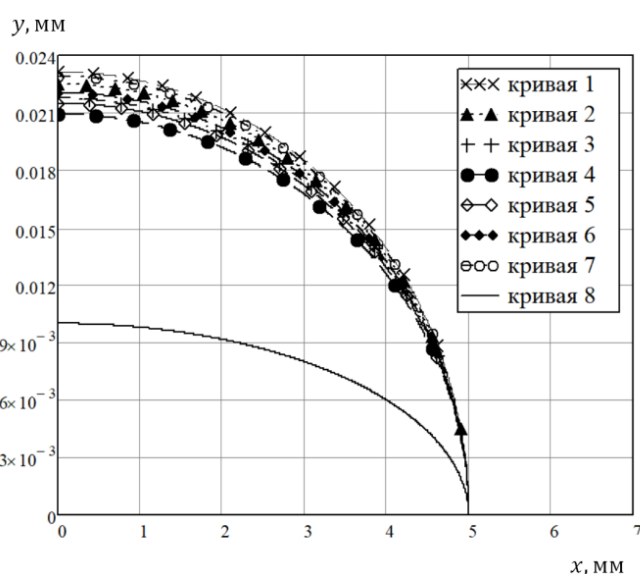


Рис. 3. Положение верхнего берега трещины при  $0 \leq x \leq l$  после перемещения вследствие нагрузки: 1 – сплав ЭИ437А; 2 – сплав ВЖ136; 3 – сплав ЭК79; 4 – сплав ЭП742; 5 – сплав ЭП741; 6 – сплав ЭИ698; 7 – сплав ЭИ437БУ; 8 – начальное раскрытие трещины без нагрузки

Таким образом, выбор жаропрочного никелевого сплава влияет на сопротивление материала нагружаемого элемента в процессе развития трещины при наличии растягивающего усилия. По результатам исследования наблюдается корреляция между процентом примесей кобальта и хрома в составе никелевых сплавов и поведением материалов при перемещении берегов трещин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жаропрочные сплавы для промышленных газовых турбин // Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». – URL: <https://viam.ru/review/3800> (дата обращения: 12.10.2022). – Текст: электронный.
2. Дуб, А. В. Исследование механизма образования трещин и разрушения рабочих лопаток турбин АЭС / А. В. Дуб, А. Е. Корнеев, А. С. Гуденко // Тяжёлое машиностроение. – 2012. – № 4. – С. 2-5.
3. Разрушение рабочих лопаток турбины вследствие высокотемпературной усталости / Ю. П. Тарасенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4 (8). – С. 132-138.
4. Людвиницкий, С. С. Предупреждение образования трещин на деталях паровых турбин из высокохромистых сталей при ручной аргодуговой сварке / С. С. Людвиницкий // Энергетик. – 2007. – № 2. – С. 22-23.
5. Обнаружение поверхностных трещин в роторах паровых турбин методом акустической эмиссии без демонтажа ротора / В. Ф. Резинских [и др.] // Энергетик. – 2007. – № 5. – С. 9-10.
6. Моделирование устойчивого роста усталостных трещин в дисках турбины авиадвигателей при простом и сложном циклах нагружения / Н. В. Туманов [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. – 2009. – № 3-1 (19). – С. 188-199.
7. Туманов, Н. В. Прогнозирование остаточного ресурса дисков турбины авиадвигателей на основании расчёта периода устойчивого роста трещин малоциклового усталости / Н. В. Туманов, М. А. Лаврентьева, С. А. Черкасова // Вестник Московского авиационного института. – 2011. – Т. 18. – № 5. – С. 33-41.
8. Орлов, М. Р. Развитие водородных трещин в монокристаллических отливках охлаждаемых рабочих лопаток турбины ГТД / М. Р. Орлов // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. – 2000. – № 2. – С. 23-27.
9. Гладштейн, В. И. Кинетика роста трещин на литых корпусных деталях турбин в процессе эксплуатации / В. И. Гладштейн, В. П. Плотников // Теплоэнергетика. – 2000. – № 4. – С. 22-26.
10. Закономерности развития поверхностных трещин в материале лопаток паровых турбин / А. П. Захаров [и др.] // Труды Академэнерго. – 2019. – № 3 (56). – С. 107-121.
11. Нгуен, Нгок Т. Анализ механики разрушения и работоспособности лопатки газовой турбины при наличии трещины / Т. Нгуен Нгок, Г. С. Коленько // Материаловедение. Энергетика. – 2020. – Т. 26. – № 3. – С. 56-69.
12. Яруллин, Р. Р. Развитие трещины в имитационной модели диска турбины ГТД при эксплуатационных условиях нагружения / Р. Р. Яруллин, В. Н. Шлянников, А. Г. Суламанидзе // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 2. – С. 203-217.
13. Сплав ЭИ437БУ (ХН77ТЮР) жаропрочный на никелевой основе // Inzhener-Info, 2016 – 2022. – URL: <https://inzhenner-info.ru/razdely/materialy/zharoprochnye-stali-i-splavy/splavy-na-nikelevoj-osnove/zharoprochnye/splav-ei437bu-khn77tyur-zharoprochnyj-na-nikelevoj-osnove.html> (дата обращения: 12.10.2022). – Текст: электронный.
14. Биргер, И. А. Сопротивление материалов / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 561 с.
15. Пестриков, В. М. Механика разрушения / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2012. – 552 с.
16. Glotka, A. & Haiduk, S. Mathematical modelling of heat-resistant nickel alloys high temperature corrosion. Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences. – 2019. – N 1. – P. 30-38. DOI: 10.31498/2225-6733.38.2019.181273.
17. Tyagunov, A. Structural changes in melts of heat-resistant nickel alloys. – 2016. – N 16. – P. 16-22. DOI:10.14529/met160402.
18. Russkih, Andrey, Krasikov, Sergey & Zhilina, Ekaterina & Podkorytov, Sergey. Thermodynamic modeling of the rare elements behavior during the dissolution of heat-resistant nickel alloys waste in mineral acids. Butlerov Communications. – 2019. – N 59. – P. 99-103. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/19-59-7-99.
19. Nanaware, Animesh, Pawar, Shivam, Manickam, Ramachandran. Mechanical Characterization of Nickel Alloys on Turbine Blades // REST Journal on Emerging trends in Modelling and Manufacturing. – 2015. – N 11. – P. 15-19.
20. Sahoo, Benudhar, Panigrahi, Sashi Kanta, Satpathy, Shri. Effect of aluminising on the low cycle fatigue life of a directionally solidified nickel-base alloy used for manufacturing turbine blade // International Journal of Materials and Structural Integrity. – 2018. – N 12. – P. 58. – DOI 10.1504/IJMSI.2018.093894.