

**ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ,  
ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И АГРЕГАТЫ  
(05.14.14)  
ТУРБОМАШИНЫ  
И КОМБИНИРОВАННЫЕ УСТАНОВКИ  
(05.04.12)**

УДК 539.421:539.422.24

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-70-76

**Влияние питтинговой поврежденности поверхности образцов из стали 20X13 на рост усталостных трещин**

А.И. Лебедева, А.Ф. Медников, В.Р. Мосин

Поврежденность поверхности рабочих лопаток паровых турбин питтингом и язвами существенно снижает их сопротивление усталости и ведет к разрушению вследствие развития усталостных трещин. Для определения ресурса работы лопаток или вероятности их поломки необходимы данные, позволяющие оценить влияние степени и характера повреждения их поверхности на сопротивление усталости. Если рабочая лопатка в нерасчетном режиме эксплуатации прошла зону повышенных амплитуд напряжений при известном числе циклов, то можно установить меру усталостной поврежденности материала лопатки. Если же амплитуды напряжений не превышали предела выносливости (с учетом коэффициента запаса и величины асимметрии цикла нагружения), то в материале лопатки усталостные трещины, приводящие к ее разрушению, не появлялись, и случае нахождения амплитуды напряжений и соответствующего числа циклов в зоне левее линии Френча не возникла необратимая усталостная поврежденность в материале лопатки. Актуальна задача определения длин усталостных трещин, образующихся у дна язвы, в зависимости от величины амплитуды напряжений и числа циклов наработки. Это позволит оценить величину поврежденного слоя и удалив его, восстановить сопротивление усталости лопатки.

Представлены результаты исследований трещиностойкости при усталостном нагружении образцов из лопаточной стали 20X13 с искусственно созданной язвенной поврежденностью поверхности. Подтверждена применимость использования расчетных зависимостей для оценки линии Френча для образцов с начальной язвенной поврежденностью и получена оценка поврежденного слоя металла у дна язв в зависимости от величины амплитуды напряжений и числа циклов наработки. Выявлена длина, при которой трещина подлежит удалению для восстановления ресурса лопаточного аппарата.

*Ключевые слова:* лопаточная сталь, язвенная поврежденность, усталостные нагружение и трещина.

*Для цитирования:* Лебедева А.И., Медников А.Ф., Мосин В.Р. Влияние питтинговой поврежденности поверхности образцов из стали 20X13 на рост усталостных трещин // Вестник МЭИ. 2022. № 2. С. 70—76. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-70-76.

**The Influence of 20Kh13 Steel Specimen Surface Pitting Damage on the Growth of Fatigue Cracks**

A.I. Lebedeva, A.F. Mednikov, V.R. Mosin

The damage to the surface of steam turbine rotor blades by pitting reduces significantly their fatigue resistance and can lead to fracture resulted from the development of fatigue cracks. To determine the service life of blades or the probability of their breakage, it is necessary to have data that allow one to assess how the degree and nature of damage to their surface affects their fatigue resistance. If the rotor blade has passed, in an off-design operation mode, the zone of increased stress amplitudes, then, given the known number of cycles, the measure of fatigue damage to the blade material can be estimated. If the stress amplitudes did not exceed the endurance limit (taking into account the safety factor and the loading cycle asymmetry value), the fatigue cracks which could lead to blade failure did not appear in the blade material. If the stress amplitudes and the corresponding number of cycles are in the zone to the left of the French line, irreversible fatigue damage did not occur in the blade material. Determination of the lengths of fatigue cracks appearing at the pit bottom as a function of stress

amplitude and number of operating cycles is a topical issue. This will make it possible to evaluate the size of the damaged layer and to restore the blade fatigue resistance by removing this layer. The results from studies of crack resistance under fatigue loading of specimens made of 20Kh13 blade steel with artificially created pitting damage to the surface are presented. The possibility of using the calculated dependences for evaluating the French line for samples with initial pitting damage has been confirmed, and an assessment of the damaged metal layer at the pit bottom depending on the stress amplitude and number of operating cycles has been obtained. The length with which the crack must be removed to restore the blade system service life has been determined.

*Key words:* blade steel, pitting damage, fatigue loading, fatigue crack.

*For citation:* Lebedeva A.I., Mednikov A.F., Mosin V.R. The Influence of 20Kh13 Steel Specimen Surface Pitting Damage on the Growth of Fatigue Cracks. Bulletin of MPEI. 2022;2:70—76. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-70-76.

### Состояние вопроса по рассматриваемой проблеме. Постановка задачи исследования

Повреждение поверхности лопаток паровых турбин из-за абразивного воздействия окалины в виде питтинга и язв характерно для лопаток первых ступеней цилиндра высокого давления, работающих в перегретом паре, и первых ступеней цилиндра среднего давления после промежуточного перегрева пара (рис. 1). Аналогичное повреждение присуще и начальной зоне фазового перехода в проточной части турбины, где возникает точечная коррозия. Эрозионным повреждениям подвергаются перефирийные зоны входных кромок рабочих лопаток всех ступеней ЦНД, работающих в области влажного пара. При нерасчетных режимах функционирования паровой турбины с малым расходом пара эрозионной поврежденности в виде питтинга подвержена прикорневая зона выходных кромок рабочих лопаток последних ступеней ЦНД [1]. Кроме того, точечная коррозия в виде питтингов и язв появляется на поверхностях проточной части при простое турбины без консервации [2 — 4]. Поврежденная поверхность рабочих лопаток существенно снижает их сопротивление усталости и ведет к усталостному разрушению вследствие развития усталостных трещин [5]. Для определения ресурса работы лопаток или вероятности их поломки необходимы данные, позволяющие оценить влияние степени и характера повреждения их поверхности на сопротивление усталости.

Актуальна задача определения длин усталостных трещин, появляющихся у дна язвы, в зависимости от величины амплитуды напряжений и числа циклов на-

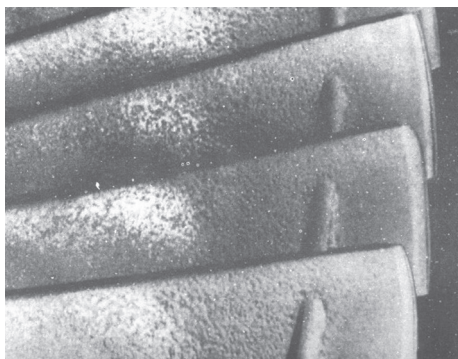


Рис. 1. Повреждение поверхности рабочих лопаток в перегретом паре

работки. Это позволит понять величину поврежденного слоя и, удалив его, восстановить сопротивление усталости лопатки.

### Метод исследования и допущения

Для определения влияния язвенной поврежденности поверхности на рост усталостных трещин использованы и обработаны данные результатов испытаний на усталость, полученные в НИУ «МЭИ» и ОАО «ВТИ» [5].

Представленные сведения получены в результате обработки итогов усталостных испытаний [5] при консольном изгибе с вращением цилиндрических образцов с повреждениями поверхности в виде язв.

В качестве образцов для испытаний взяты цилиндрические образцы из стали 20X13 из одной плавки, обладающие тремя рядами язв, нанесенных электрохимическим способом в ОАО «ВТИ».

### Механические свойства стали 20X13

$\sigma_b$ , МПа .....	792
$\sigma_{0,2}$ , МПа .....	640
Относительное удлинение, % .....	19,4
Относительное сужение, % .....	62,3
Ударная вязкость, МДж/м .....	0,80

Разработанная в ОАО «ВТИ» методика электрохимического нанесения повреждений заключается в следующем. На рабочую поверхность гладкого образца наносят лак, в котором перфорируют отверстия заданного размера с определенным шагом. Не покрытая лаком поверхность образца защищена парафином. Поверхность металла в перфорированных в лаковом покрытии отверстиях парафином не покрывают. Затем образец погружают в раствор 10% FeCl<sub>3</sub> (рН 2,2). Через раствор и образец пропускают постоянный ток, вызывающий анодное растворение металла в перфорированных поверхностях. Глубина растворения искусственно созданных язв зависит от силы тока и времени его воздействия.

Следуя представленной методике на поверхности каждого образца создавали практически одинаковые язвы с фиксированным диаметром, глубиной и шагом. На рисунке 2 дан фрагмент образца с тремя рядами язв. Отмечено, что характер повреждения металла на поверхности искусственных язв близок к характеру язвенного повреждения в естественных условиях. Прак-

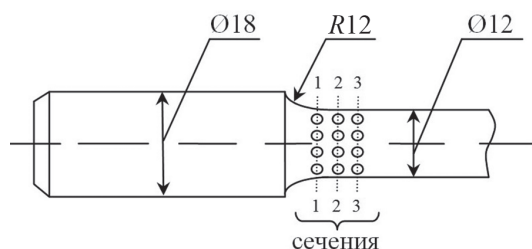


Рис. 2 Фрагмент цилиндрического образца с цепочками язв

тическая идентичность повреждений подтверждена металлографическими исследованиями и результатами измерения микротвердости поверхности металла под язвами. Естественные язвы диаметром 0,1 мм имеют такое же соотношение между диаметром и глубиной, как и искусственно созданные.

После проведения процесса по созданию искусственных язв образцы испытывали на консольный изгиб с вращением в НИУ «МЭИ». Для изучения усталостных трещин у дна язв были выбраны образцы из серии с наибольшим размером язв. Усталостная кривая приведена на рис. 3. Выявленный предел выносливости  $\sigma_{-1}$  составил 177 МПа на базе  $10^7$  циклов. Усталостное разрушение образцов проходило по ряду язв, близкому к галтели (сечение 1–1), в области с наибольшим значением амплитуды напряжений.

После усталостных испытаний несколько образцов из серии были разрезаны по цепочкам двух рядов язв в сечениях 2–2 и 3–3 (см. рис. 2), по которым не прошел усталостный излом. В результате замеров с использованием электронного микроскопа получены длины усталостных трещин  $l$ , возникших на изломе образцов и в сечениях на срезах у дна язв. Размеры язв (средняя глубина  $h_{cp}$  и диаметр  $d_{cp}$ ), значения амплитуд номинальных напряжений  $\sigma$  и число циклов до разрушения  $N$  исследованных образцов указаны в таблице.

### Полученные результаты и их анализ

По результатам таблицы для каждого из четырех образцов построены зависимости длины трещины  $l$  от амплитуды номинальных напряжений  $\sigma$  в соответствующем сечении при числе циклов, отвечающем разрушению данного образца (рис. 4). Экстраполяция зависимостей дает значение амплитуд напряжений ( $\bullet$ , рис. 4), при которых трещина не превышает размера зерна, равного 20 мкм для стали 20Х13. Полученные данные позволяют построить экспериментальную линию Френча, отражающую наступление необратимых усталостных повреждений в материале, возникающих при размере трещины, превышающем размер зерна.

На рисунке 5 изображены зависимости амплитуды напряжений от числа циклов для выбранных длин трещин 20, 200 и 400 мкм. Схема определения амплитуд напряжений для выбранных длин трещин выполнена на примере трещины длиной 400 мкм ( $\bullet$ , рис. 4).

Физический смысл линии Френча заключается в том, что при ее достижении в испытаниях на усталость металл содержит в поверхностном слое микроскопические трещины длиной порядка зерна. Фактически это свидетельствует о том, что в металле завершился первый период усталости (инкубационный период, период зарождения микротрещин), а последующее нагружение связано с периодом роста усталостных трещин и началом необратимой усталостной поврежденности.

Выполнено сравнение экспериментально полученной линии Френча с расчетной. Расчет сделан по зависимостям, предложенным в [7, 8].

Уравнение кривой Веллера, отвечающей усталостному разрушению образца, запишем в виде:

$$N\sigma^{b_v} = N_0\sigma_{-1}^{b_v},$$

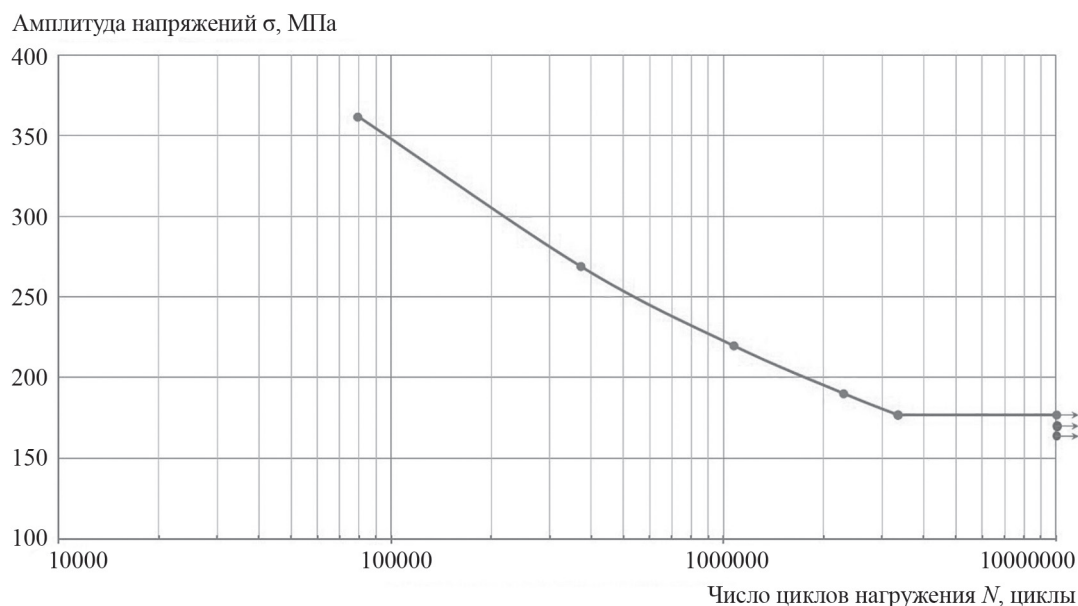


Рис. 3. Кривая Веллера для образцов из стали 20Х13 с язвенной поврежденностью поверхности

**Размеры язв, значения амплитуд напряжений, число циклов до разрушения и длины усталостных трещин у дна язв**

Номер образца	Средний диаметр язв $d_{cp}$ , мм	Средняя глубина язв $h_{cp}$ , мм	Число циклов $N$	Номер сечения	Амплитуда напряжений $\sigma$ , МПа	Длина трещины $l$ , мкм
1	1,498	0,461	$5,01 \cdot 10^4$	1	392	3043
				2	373	180
				3	354	25
2	1,378	0,470	$1,99 \cdot 10^5$	1	295	3540
				2	281	260
				3	267	200
3	1,480	0,412	$6,92 \cdot 10^5$	1	245	3883
				2	233	420
				3	221	200
4	1,388	0,482	$1,74 \cdot 10^6$	1	199	4070
				2	186	$\leq 20$
				3	177	нет

Длина трещины  $l$ , мкм

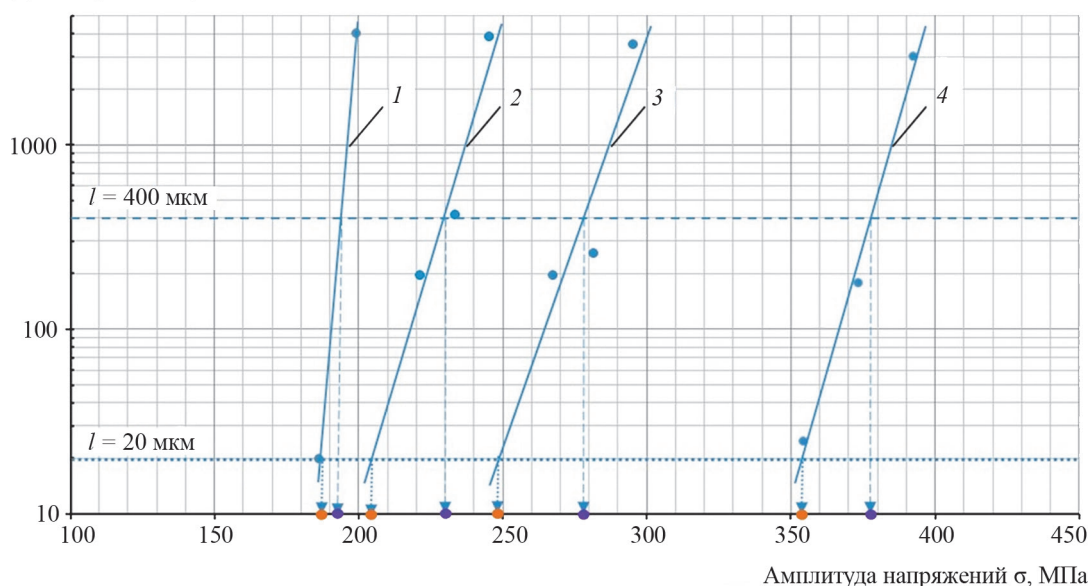


Рис. 4. Зависимость длины усталостной трещины от величины амплитуды напряжений и числа циклов нагружения:

$$1 - N = 1,74 \cdot 10^6; 2 - N = 6,92 \cdot 10^5; 3 - N = 1,99 \cdot 10^5; 4 - N = 5,01 \cdot 10^4$$

где  $N$  — число циклов до разрушения;  $\sigma$  — амплитуда напряжений;  $N_0$  — число циклов, отвечающее перегибу усталостной кривой;  $\sigma_{-1}$  — предел выносливости образца.

Для усталостной кривой (см. рис. 2)  $\sigma_{-1} = 177$  МПа;  $N_0 = 3,347 \cdot 10^6$  циклов;  $b_v = 5,229$ .

Уравнение линии Френча, отвечающей началу необратимой поврежденности материала образца, выглядит следующим образом:

$$N_f \sigma^{b_f} = N_0 \sigma_{-1}^{b_f},$$

где  $N_f$  — число циклов до появления необратимой поврежденности.

Величина показателя степени  $b_f$  рассчитывается из зависимости

$$b_f = \frac{b_v \lg[\sigma_{-1}/(\sigma_k + 60)]}{\lg(\sigma_{-1}/\sigma_k)},$$

где  $\sigma_k$  — амплитуда напряжений, отвечающая кривой Веллера при  $N = 2 \cdot 10^5$  циклов.

Показатель степени в уравнении линии Френча для рассматриваемой серии образцов  $b_f = 6,980$ . На рисунке 6 приведены расчетная 2 и экспериментально полученная 3 линии Френча, отвечающие длине трещины равной размеру зерна ( $l = 20$  мкм) и полученные в результате обработки данных усталостных испытаний материала исследуемых образцов.



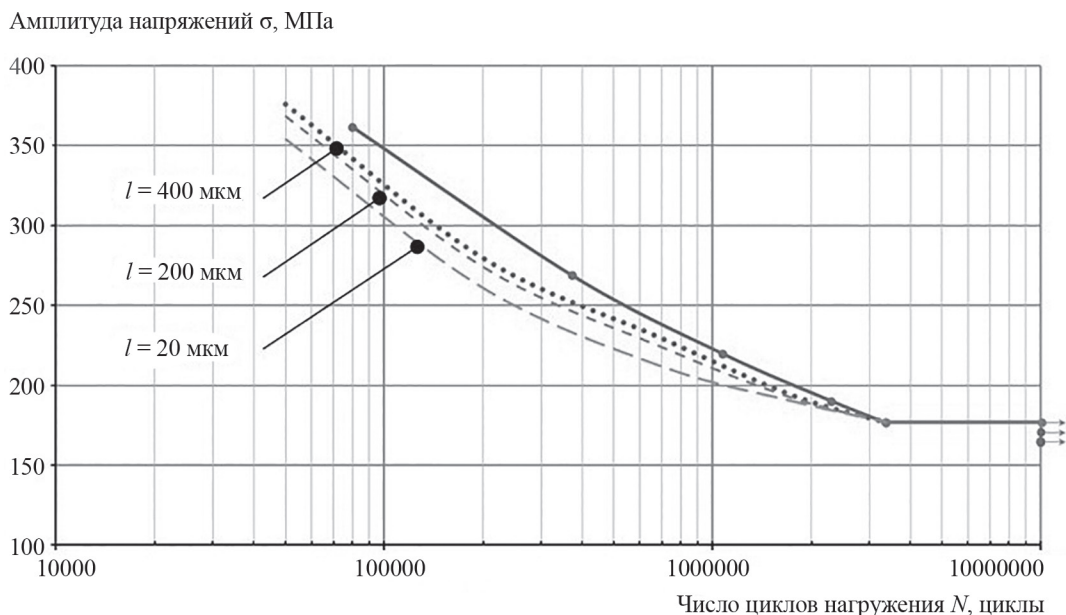


Рис. 5. Усталостные кривые для образцов из стали 20X13 с язвенной поврежденностью поверхности при различных длинах трещин

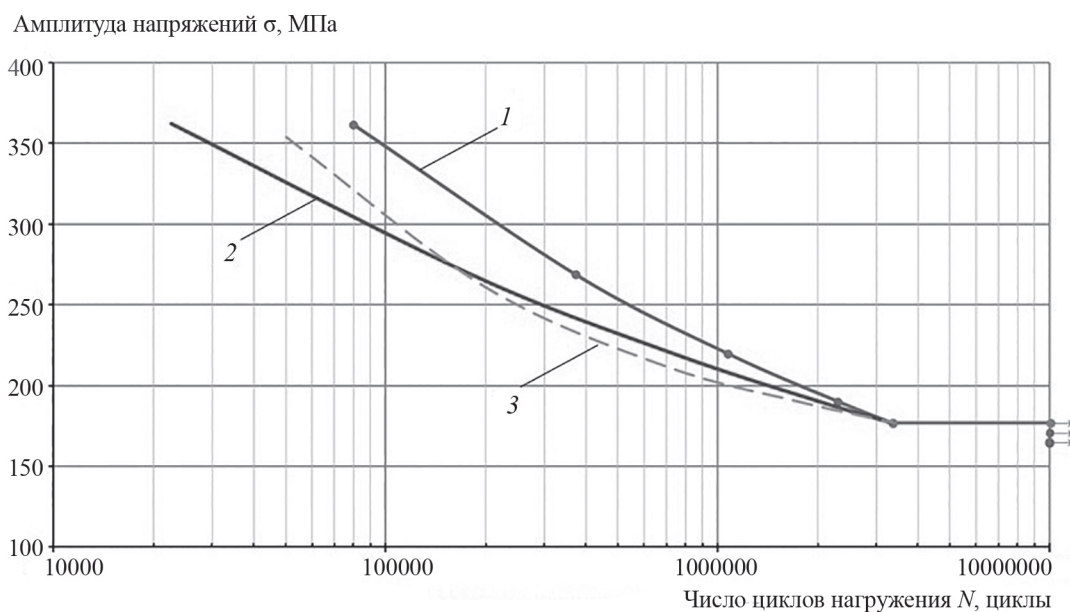


Рис. 6. Усталостные кривые для образцов из стали 20X13 с язвенной поврежденностью поверхности:

1 — кривая Веллера; 2 — расчетная линия Френча; 3 — экспериментальная линия Френча, отвечающая длине трещины, равной размеру зерна ( $l = 20 \text{ мкм}$ )

Из сопоставления расчетной и экспериментально полученной линий начала необратимой усталостной поврежденности можно сделать следующие выводы. Расчетная линия Френча для больших значений амплитуд напряжений расположена несколько левее экспериментально полученной, что идет в запас надежности при использовании расчетного метода усталостной поврежденности. При меньших значениях амплитуд напряжений оценка, полученная экспериментально, несколько меньше по числу циклов, чем расчетная, но с учетом естественного разброса усталостных свойств

материала по числу циклов в 2...2,5 раза можно считать приемлемой расчетную оценку линии Френча для деталей с язвенной поврежденностью поверхности.

При прохождении рабочей лопаткой в нерасчетном режиме эксплуатации зоны повышенных амплитуд напряжений при известном числе циклов можно установить меру усталостной поврежденности материала. Если амплитуды напряжений не превышают предела выносливости (с учетом коэффициента запаса и величины асимметрии цикла нагружения), то в материале лопатки не появляются усталостные трещины, веду-

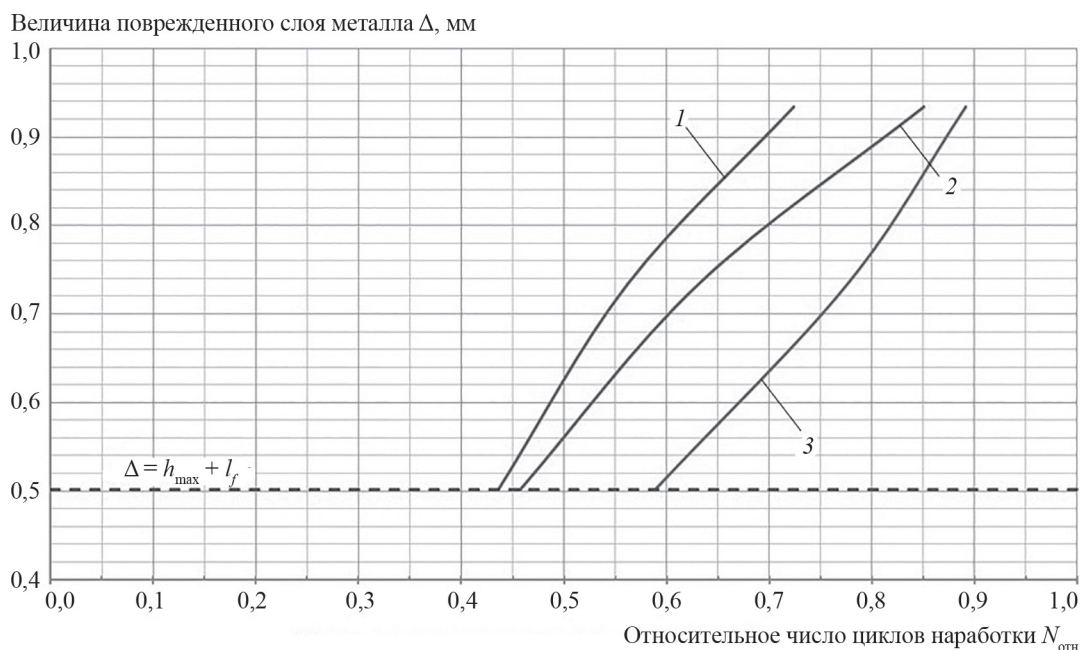


Рис. 7. Зависимость величины слоя металла  $\Delta$ , подлежащего снятию, от относительной наработки  $N_{отн}$  для значений относительной амплитуды напряжений  $\sigma_{отн} = 1,5$  (1); 1,3 (2) и 1,1 (3)

шие к ее разрушению. Если амплитуды напряжений и соответствующее число циклов располагаются в зоне левее линии Френча, то и в этом случае необратимая усталостная поврежденность в материале лопатки не наступает.

В случае, когда амплитуда напряжений и число циклов таковы, что поврежденность материала лопатки попадает в зону между линиями 1 и 2 (см. рис. 6), необходимо оценить величину поврежденного слоя металла у дна язвы и удалить этот слой для восстановления ресурса пера лопатки. Возможность удаления поврежденного слоя установлена в [3], где определено допустимое изменение формы профиля и толщины лопатки. Если поврежденный слой достаточно большой, то лопатку меняют на новую или проводят восстановительный ремонт одним из способов, указанных в [9].

По результатам поставленных экспериментов на рис. 7 даны зависимости величины слоя металла  $\Delta$ , подлежащего снятию после относительной наработки  $N_{отн} = N_l/N$  при относительной амплитуде напряжений  $\sigma_{отн} = \sigma/\sigma_{-1}$  ( $N$  — число циклов до разрушения при амплитуде напряжений  $\sigma$ ;  $N_l$  — число циклов до появления у дна язвы усталостной трещины длиной  $l$ ).

Величина  $\Delta$  равна сумме максимальной глубины язвы  $h_{max}$  и длины усталостной трещины у дна язвы  $l_f$ , возникшей при данной амплитуде напряжений за определенное число циклов:  $\Delta = h_{max} + l_f$ . В нашем случае за-

фиксированная максимальная глубина язвы составляет 482 мкм, а минимальная длина трещины у дна язвы, отвечающая границе инкубационного периода, равна 20 мкм. Трещины меньшей длины, чем  $l_f$ , не вносят необратимой усталостной поврежденности в материал.

Линия 1 на рис. 7 построена для относительной амплитуды напряжений  $\sigma_{отн} = 1,5$ ; 2 — для  $\sigma_{отн} = 1,3$ ; 3 — для  $\sigma_{отн} = 1,1$ . При построении этих линий использованы данные рис. 5. При постоянных значениях напряжений получены значения числа циклов, отвечающие значениям длин трещин  $l$ , — 20, 200 и 400 мкм.

Величина  $\Delta$  для каждого из изучаемых случаев отвечает сумме максимальной глубины язвы  $h_{max}$  и длины усталостной трещины у дна язвы  $l_f$ , возникшей при указанной амплитуде напряжений за определенное число циклов. На рисунке 7 даны зависимости значений величины слоя металла  $\Delta$ , подлежащего снятию, от относительного числа циклов наработки  $N_{отн}$  для трех вариантов  $\sigma_{отн}$ .

### Заключение

Показана применимость использования расчетных зависимостей для оценки линии Френча у образцов с начальной язвенной поврежденностью.

Получена оценка поврежденного слоя металла, подлежащего удалению для восстановления сопротивления усталости и ресурса рабочих лопаток.

### Литература

1. Рыженков В.А., Лебедева А.И., Медников А.Ф. Современное состояние и способы решения проблемы эрозионного износа лопаток влажно-паровых ступеней турбин // Теплоэнергетика. 2011. № 9. С. 8—13.

### References

1. Ryzhenkov V.A., Lebedeva A.I., Mednikov A.F. Sovremennoe Sostoyanie i Sposoby Resheniya Problemy Eroziionnogo Iznosa Lopatok Vlazhno-parovyh Stupenej Turbin. Teploenergetika. 2011;9:8—13. (in Russian).

2. **Чернецкий Н.С.** Коррозионные повреждения лопаток турбин // Теплоэнергетика. 1984. № 4. С. 68—71.

3. **Орлик В.Г.** Снижение абразивной эрозии турбинных ступеней перегретого пара // Электрические станции. 2008. № 12. С. 33—41.

4. **ГОСТ 34497—2018.** Лопатки паровых турбин. Основные требования по замене.

5. **Лебедева А.И., Соколов В.С., Резинских В.Ф., Богачев А.Ф.** Влияние язвенной коррозии на сопротивление усталости лопаточных материалов // Теплоэнергетика. 1992. № 2. С. 11—14.

6. **Шлянников В.Н., Яруллин Р.Р., Захаров А.П.** Влияние защитных покрытий на характеристики сопротивления деформированию и разрушению материала лопаток паровых турбин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. № 82(3). С. 53—59.

7. **Иванова В.С., Терентьев В.Ф.** Природа усталости металлов. М.: Metallurgiya, 1975.

8. **Иванова В.С.** Усталостное разрушение металлов. М.: Metallurgizdat, 1963.

9. **Лебедева А.И., Настека Д.В.** Современные методы восстановления лопаток паровых турбин // Электрические станции. 2018. № 8. С. 19—24.

2. **Cherneckij N.S.** Korrozionnye Povrezhdeniya Lopatok Turbin. Teploenergetika. 1984;4:68—71. (in Russian).

3. **Orlik V.G.** Snizhenie Abrazivnoj Erozii Turbinnyh Stupeney Peregretogo Para. Elektricheskie stancii. 2008; 12:33—41. (in Russian).

4. **GOST 34497—2018.** Lopatki Parovyh Turbin. Osnovnye Trebovaniya po Zamene. (in Russian).

5. **Lebedeva A.I., Sokolov V.S., Rezinskih V.F., Bogachev A.F.** Vliyanie Yazvennoj Korrozii na Soprotivlenie Ustalosti Lopatochnyh Materialov. Teploenergetika. 1992;2:11—14. (in Russian).

6. **Shlyannikov V.N., Yarullin R.R., Zaharov A.P.** Vliyanie Zashchitnyh Pokrytij na Harakteristiki Soprotivleniya Deformirovaniyu i Razrusheniyu Materiala Lopatok Parovyh Turbin. Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov. 2016;82(3):53—59. (in Russian).

7. **Ivanova V.S., Terent'ev V.F.** Priroda Ustalosti Metallov. M.: Metallurgiya, 1975. (in Russian).

8. **Ivanova V.S.** Ustalostnoe Razrushenie Metallov. M.: Metallurgizdat, 1963. (in Russian).

9. **Lebedeva A.I., Nasteka D.V.** Sovremennye Metody Vosstanovleniya Lopatok Parovyh Turbin. Elektricheskie Stancii. 2018;8:19—24. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Лебедева Александра Ивановна** — кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра «Экология энергетики» НИУ «МЭИ», e-mail: ailebedewa@yandex.ru

**Медников Алексей Феликсович** — кандидат технических наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин им. А.В. Щегляева НИУ «МЭИ», e-mail: MednikovAIF@mpei.ru

**Мосин Владислав Романович** — студент НИУ «МЭИ», e-mail: MosinVR@mpei.ru

#### Information about authors:

**Lebedeva Aleksandra I.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Scientific and Educational Center «Ecology of Energy», NRU MPEI, e-mail: ailebedewa@yandex.ru

**Mednikov Aleksey F.** — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Steam and Gas Turbines named after A.V. Shcheglyayev Dept., NRU MPEI, e-mail: MednikovAIF@mpei.ru

**Mosin Vladislav R.** — Student of NRU MPEI, e-mail: MosinVR@mpei.ru

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 29.06.2021

**The article received to the editor:** 29.06.2021