

DOI: 10.34220/2311-8873-2024-11-21



УДК 621.8

UDC 621.8

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА КОНЦЕНТРАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МАТЕРИАЛА ДЕТАЛЕЙ

THEORETICAL ANALYSIS OF THE EFFECT OF CORROSION OF THE SURFACE OF MACHINE PARTS ON THE STRESS CONCENTRATION IN THE SURFACE LAYER OF THE MATERIAL OF THE PARTS

✉¹ **Безъязычный Вячеслав Феоктистович**, д.т.н., проф. кафедры авиационных двигателей и общего машиностроения, Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева, г. Рыбинск e-mail: technology@rsatu.ru

✉¹ **Bezjazychnyi Vyacheslav Feoktistovich**, doctor of technical sciences, professor of the department of aircraft engines and general mechanical engineering, Rybinsk state aviation technical university named after P. A. Solovyov, Rybinsk, e-mail: technology@rsatu.ru

Плешкун Владислав Валерианович, заместитель главного технолога ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск.

Pleshkun Vladislav Valerianovich, deputy chief technologist of PJSC UEC-Saturn, Rybinsk.

Аннотация. Изложены результаты исследования влияния коррозии поверхности детали после механической обработки лезвийным инструментом на показатель прочности материала детали, характеризуемый концентрацией напряжений в поверхностном слое материала деталей – эффективным коэффициентом концентрации напряжений. Представлена расчетная зависимость и результаты расчета с оценкой степени изменения влияния коррозии на шероховатость поверхности и ее влияние на изменение коэффициента концентрации напряжений.

Annotation. The results of the study of the effect of corrosion of the surface of the part after machining with a blade tool on the strength index of the material of the part, characterized by the stress concentration in the surface layer of the material of the parts - the effective stress concentration coefficient. The calculated dependence and calculation results are presented with an assessment of the degree of change in the effect of corrosion on the surface roughness and its effect on the change in the stress concentration coefficient.

Ключевые слова: ОБРАБОТКА РЕЗАНИЕМ, ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ, КОРРОЗИЯ ПОВЕРХНОСТИ, КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ.

Keywords: CUTTING, SURFACE LAYER, SURFACE CORROSION, STRESS CONCENTRATION IN THE MATERIAL OF THE SURFACE LAYER.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В материалах деталей машин, в том числе и в материалах деталей ГТД, в силу их конструктивных особенностей, а также в силу особенностей их работы, возможно создание концентрации напряжений, т. е. неравномерное их распределение в материале детали, которое характеризуется коэффициентом концентрации напряжений.

Концентрация напряжений при простом напряженном состоянии оценивается теоретическим концентратором напряжений α_σ , равным отношению напряжения при наличии концентратора к напряжению в той же точке при отсутствии концентратора. При усталостном знакопеременном нагружении деталей концентрация напряжений оценивается эффективным концентратором напряжений K_σ , который характеризует отношение предела выносливости образца с концентрацией напряжений к пределу выносливости гладкого образца такого же размера без концентрации напряжений [1-6].

Концентратором напряжений в материале деталей при усталостном нагружении может быть и шероховатость поверхности [1]. Учитывая тот факт, что шероховатость поверхности в процессе эксплуатации вследствие коррозионного воздействия изменяется [7], можно сделать вывод о влиянии коррозионного процесса на усталостную прочность детали, оцениваемую пределом выносливости материала детали σ_{-1} [2, 3].

К сожалению, надлежащим образом этот вопрос изучен недостаточно. Практически отсутствуют сведения о степени и характере влияния изменения шероховатости поверхности детали в процессе эксплуатации вследствие коррозионных процессов. Известные авторам данной работы научные и практические публикации по проблеме коррозии деталей машин, в том числе авиационных газотурбинных двигателей, относятся к вопросам химических процессов коррозии, а также к вопросам получения материалов с целью снижения влияния коррозии на эксплуатационные свойства деталей машин [8-14]. В связи с изложенным вопрос изучения влияния коррозионных процессов на изменение прочностных характеристик материала поверхностного слоя детали, в частности, на изменение эффективного коэффициента концентрации напряжений, в том числе в авиадвигателестроении, является актуальной задачей. Для целей исследования, по мнению авторов, потребовалось на основе исследований [1] разработать расчетную зависимость для проведения исследования.

2 Материалы и методы

Обоснование расчетной зависимости для определения коэффициента концентрации напряжений в поверхностном слое материала детали

Для условий оптимального резания, характеризуемого минимумом износа режущего инструмента [15], используя факт стабильности процесса резания и, как следствие, высоты неровностей на обработанной поверхности, можно определять влияние условий обработки, в частности режимов резания, на предел выносливости материала детали эффективным коэффициентом концентрации напряжений [2]:

$$K_\sigma = 1 + q_\sigma (\alpha_\sigma - 1),$$

где α_σ – теоретический коэффициент концентрации нормальных напряжений: при кручении и сдвиге $\alpha_\sigma = 1 + \sqrt{\gamma t / \rho}$; при растяжении и изгибе $\alpha_\sigma = 1 + 2\sqrt{\gamma t / \rho}$, где t – максимальная глубина впадины концентратора напряжений; ρ – радиус кривизны на дне впадины; γ – коэффициент, зависящий от отношения шага неровностей к их высоте; q_σ – коэффициент чувствительности металла к концентрации напряжений.

Значение коэффициента γ может быть определено по рекомендациям [3], однако более удобным является использование зависимости, полученной на основе данных, приведенных в

этой работе, с использованием которых построены графики, представленные на рис. 1 и 2, на основе которых получена зависимость вида: $\gamma = x \cdot (Sm/Rz)^y$, где Sm – средний шаг неровностей по средней линии; Rz – высота неровностей на поверхности. Значение коэффициента x и показателя степени y в формуле при различных значениях соотношения Sm/Rz представлены в табл. 1.

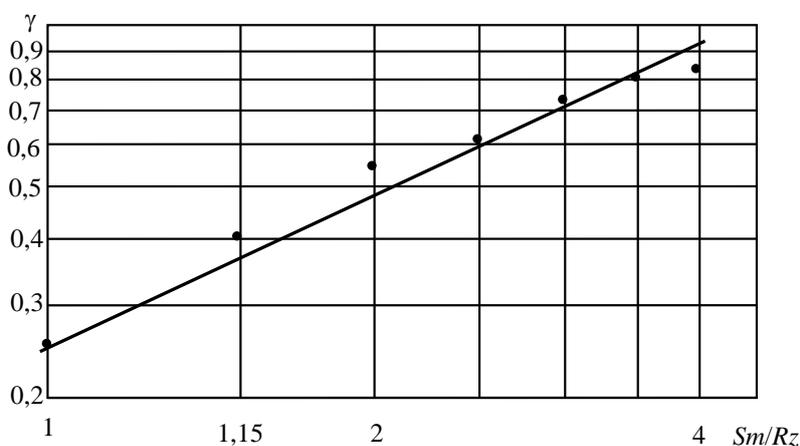


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента γ от величины отношения шага неровностей к их высоте (Sm/Rz до 4)

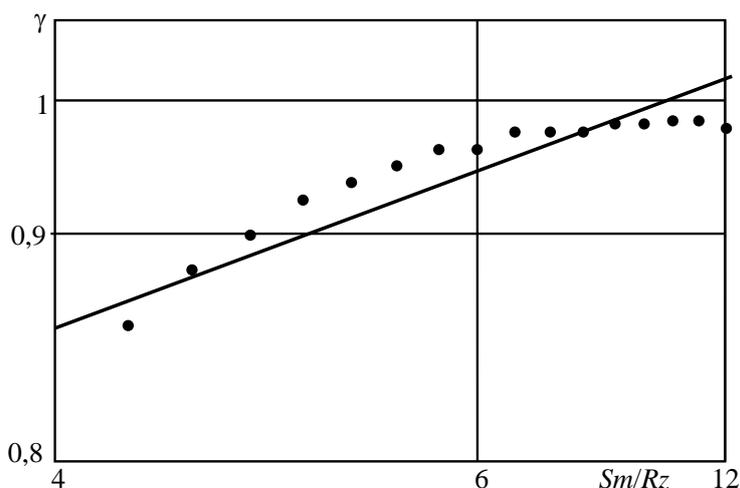


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента γ от величины отношения шага неровностей к их высоте (Sm/Rz от 4 и более)

Таблица 1 – Значения x и y в формуле для определения γ

Значения Sm/Rz	x	y	При R^2
до 4	0,25	0,944	0,9859
от 4 и выше	0,76	0,134	0,8155

Значение q_σ определяется по формуле $q_\sigma = 1/(1 + a/r_{\text{ВП}})$, где a – константа материала [4]. Значения её следует принимать в зависимости от предела прочности материала детали на растяжение из таблицы, приведенной в [3]. Однако более удобно использовать зависимость, полученную с использованием графика, представленного на рис. 3 и построенного на основе данных, приведенных в [3].

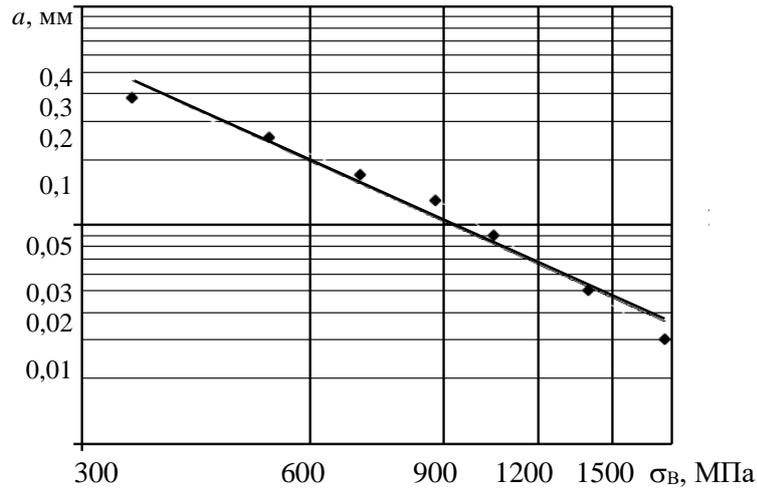


Рисунок 3 – Значение коэффициента a в зависимости от предела прочности материала на разрыв σ_B

На основе графика (рис. 3) при $R^2 = 0,9729$ значение a определяется по формуле, мкм:

$$a = 4610\sigma_B^{-1,573},$$

где σ_B – предел прочности материала детали на разрыв, МПа.

Принимаем $t = Rz$, так как высота микронеровностей на поверхности при обработке с оптимальной температурой резания $Rz = R_{max}$, где Rz – высота неровностей на обработанной поверхности, R_{max} – максимальная высота неровностей.

С учётом вышеизложенного и того, что $Ra = 0,2Rz$ [17], после преобразования формула для определения α_σ при кручении и сдвиге принимает вид

$$\alpha_\sigma = 1 + 2,58 \left(\frac{Rz}{Sm} \right) \sqrt{x \left(\frac{Sm}{Rz} \right)^y},$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля.

Принимая $\rho = r_{вп} = 0,03(Sm/Ra)$ [17], где $r_{вп}$ – радиус кривизны впадин профиля неровностей, после преобразований эффективный коэффициент концентрации напряжений может быть определен по формулам:

– при кручении и сдвиге

$$K_\sigma = 1 + \frac{0,387 RzSm}{0,15Sm^2 + aRz} \sqrt{x(Sm/Rz)^y}; \quad (1)$$

– при растяжении и изгибе

$$K_\sigma = 1 + \frac{0,774 RzSm}{0,15Sm^2 + aRz} \sqrt{x(Sm/Rz)^y}. \quad (2)$$

3 Результаты исследований

Были выполнены расчеты значений K_{σ} для образцов из стали 30ХГСА, фрагмент которых представлен в табл. 2.

Таблица 2 – Фрагмент расчета изменений коэффициентов концентрации напряжений в поверхностном слое материала детали (сталь 30ХГСА) вследствие коррозии в процессе эксплуатации

Условия обработки	S , мм/об	S_m , мкм	$Rz_{исх}$, значение после обработки (изготовления), мкм	τ , год эксплуатации	Rz , значение после эксплуатации, мкм	$K_{\sigma 1}$, кручение и сдвиг	$K_{\sigma 2}$, растяжение и изгиб	$(K_{\sigma 2 кор} - K_{\sigma 2 исх}) / K_{\sigma 2 исх}$, %
$V = 150$ м/мин; $r = 1$ мм; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 15^\circ$; $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 15^\circ$; $t = 0,5$ мм; $\rho_1 = 20$ мкм	0,1	141	2,5 $K_{\sigma 1} = 1,049$, $K_{\sigma 2} = 1,097$	1	4,298	1,077	1,153	5,10
				2	4,76	1,083	1,167	6,38
				3	5,081	1,088	1,176	7,20
				4	5,335	1,091	1,183	7,84
				5	5,549	1,094	1,188	8,30
	0,15	183	4,2 $K_{\sigma 1} = 1,062$, $K_{\sigma 2} = 1,124$	1	6,435	1,089	1,177	4,72
				2	7,01	1,095	1,19	5,87
				3	7,412	1,1	1,199	6,67
				4	7,731	1,103	1,206	7,30
				5	7,799	1,104	1,208	7,47
	0,2	247	7,7 $K_{\sigma 1} = 1,082$, $K_{\sigma 2} = 1,164$	1	10,579	1,108	1,216	4,47
				2	11,323	1,114	1,228	5,50
				3	11,843	1,118	1,237	6,27
				4	12,256	1,122	1,244	6,87
				5	12,604	1,125	1,249	7,30
	0,25	302	11,5 $K_{\sigma 1} = 1,099$, $K_{\sigma 2} = 1,198$	1	14,904	1,124	1,247	4,09
				2	15,785	1,13	1,26	5,18
				3	16,401	1,134	1,268	5,84
				4	16,891	1,137	1,275	6,43
				5	17,303	1,14	1,28	6,84

Учитывая, что шероховатость обработанной поверхности в наибольшей степени зависит от подачи S , радиуса при вершине резца в плане r и радиуса округления режущей кромки резца ρ_1 , был выполнен анализ влияния этих параметров процесса резания на значение эффективного коэффициента напряжений K_{σ} .

Характер влияния на значение эффективного коэффициента концентрации напряжений в материале поверхностного слоя детали изменения скорости резания V и подачи S для материала 30ХГСА представлен на рис. 4.

Зависимость изменения $K_{\sigma_{2 кор}}$ от радиуса скругления лезвия резца r при вершине приведена на рис. 5.

Изменение $K_{\sigma_{2 кор}}$ от радиуса округления лезвия режущей кромки ρ_1 представлено на рис. 6.

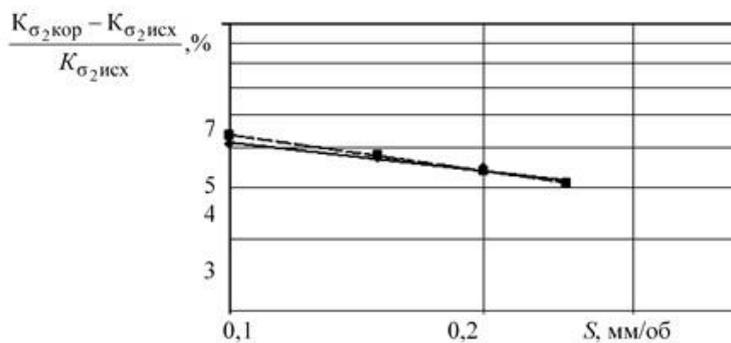


Рисунок 4 – Зависимость изменения $K_{\sigma_2\text{кор}}$ от скорости резания и подачи при длительности эксплуатации один год

Обозначения на рис. 4:

$$\begin{aligned} \text{—} \quad V = 150 \text{ м/мин, } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 3,0233 S^{-0,231}, \% , \\ \text{- - - - -} \quad V = 190 \text{ м/мин, } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 2,7327 S^{-0,294}, \% , \\ \text{- - - - -} \quad V = 250 \text{ м/мин, } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 2,7542 S^{-0,29}, \% . \end{aligned}$$

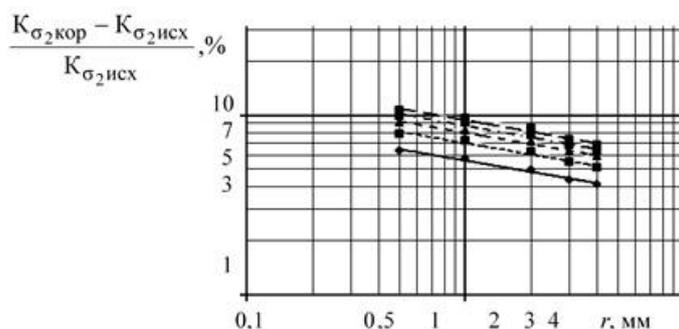


Рисунок 5 – Зависимость изменения $K_{\sigma_2\text{кор}}$ от радиуса скругления лезвия при вершине резца в плане

Обозначения на рис. 5:

$$\begin{aligned} \text{—} \quad \text{при эксплуатации 1 год: } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 5,5789 r^{-0,21}, \% , \\ \text{- - - - -} \quad \text{при эксплуатации 2 года: } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 6,9918 r^{-0,212}, \% , \\ \text{- - - - -} \quad \text{при эксплуатации 3 года: } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 7,9847 r^{-0,211}, \% , \\ \text{- \cdot - \cdot -} \quad \text{при эксплуатации 4 года: } & \frac{K_{\sigma_2\text{кор}} - K_{\sigma_2\text{исх}}}{K_{\sigma_2\text{исх}}} = 8,7434 r^{-0,217}, \end{aligned}$$

φ_1 углы реза в плане, радиусы при вершине реза в плане r и округления режущей кромки реза) и др.

3) Определяется величина параметра шероховатости обработанной поверхности $Rz_{исх}$, мкм:

$$Rz_{исх} = \frac{1}{8r} \left\{ \frac{0,6625 a_1^{0,125} c_p \rho \theta_0 \left[4,3(\sin \alpha)^{0,115} V_o^{0,57} a_1^{0,345} \lambda \left(\frac{t}{m} \right)^{0,3} + \lambda_p \beta \varepsilon a^{0,57} \rho_1^{0,075} \right]}{\left[\tau_p a^{-0,42} (\sin \alpha)^{0,025} V_o t^{0,25} m^{0,75-n_o} C_o b^{0,04} \rho_1^{n_o-0,1} (1 - 0,45 \sin \gamma) \right]} \right\}^{\frac{2}{1-n_o}},$$

где a_1 и t – толщина среза и глубина резания при обработке, м; V_o – оптимальная скорость резания, м/с; α и γ – задний и передний углы режущей части инструмента, градус; a – температуропроводность материала обрабатываемой детали, м²/с; λ и λ_p – коэффициенты теплопроводности обрабатываемого и инструментального материалов, Вт/м·К; β и ε – угол заострения и угол при вершине реза в плане, радиан; r и ρ_1 – радиус при вершине реза в плане и радиус округления режущей кромки инструмента, м; c_p – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/м³·К; θ_0 – оптимальная температура в зоне резания, °С; τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, МПа; b – длина контакта режущих кромок инструмента с обрабатываемой деталью, м; m – безразмерная величина, зависящая от соотношения подачи и глубины резания, а также геометрических параметров режущей части инструмента [17]; c_o и n_o – постоянные для конкретного сочетания обрабатываемого и инструментального материалов [17].

4) Определяется комплексный параметр скорости коррозионного изнашивания K_c обработанной поверхности в процессе эксплуатации по формуле:

$$K_c = b_o U_H^{b_1} \sqrt{\frac{770}{Sm}},$$

где U_H – степень наклепа материала поверхностного слоя детали после обработки, %; Sm – шаг неровностей по средней линии, мкм; b_o и b_1 – коэффициенты, зависящие от марки и состояния материала (после термической обработки) [19].

5) Определяется скорость коррозионного изнашивания $V_K = V_{K_0} \cdot K_c$,

где V_{K_0} – скорость коррозии образца сравнения, определяемая по формуле в соответствии с методикой Федонина О. Н. [18-21].

6) Определяется параметр шероховатости поверхности Rz после коррозионного воздействия на поверхностный слой материала детали по формулам, мкм:

$$Rz = Rz_{исх} + 3 \sqrt{\frac{3V_K \tau S_m Rz_{исх}}{4 \sin \beta}} + V_K \tau (1 - K_B), \text{ мкм}$$

или

$$Rz = 10,7 \tau^{0,8146} V^{0,1159} \tau^{-0,0059} S^{1,6085} \tau^{-0,057} t^{0,216} \tau^{-0,0064} r^{0,5053} \tau^{-0,087} \rho_1^{0,2498} \tau^{-0,0063} \varphi^{0,1632} \tau^{-0,065},$$

где τ – время корродирования, год; $K_B = 1,28 \dots 2,0$ – коэффициент, учитывающий соотношение скорости коррозии материала выступов и впадин неровностей; β – угол наклона профиля шероховатости, рад; φ – главный угол резца в плане.

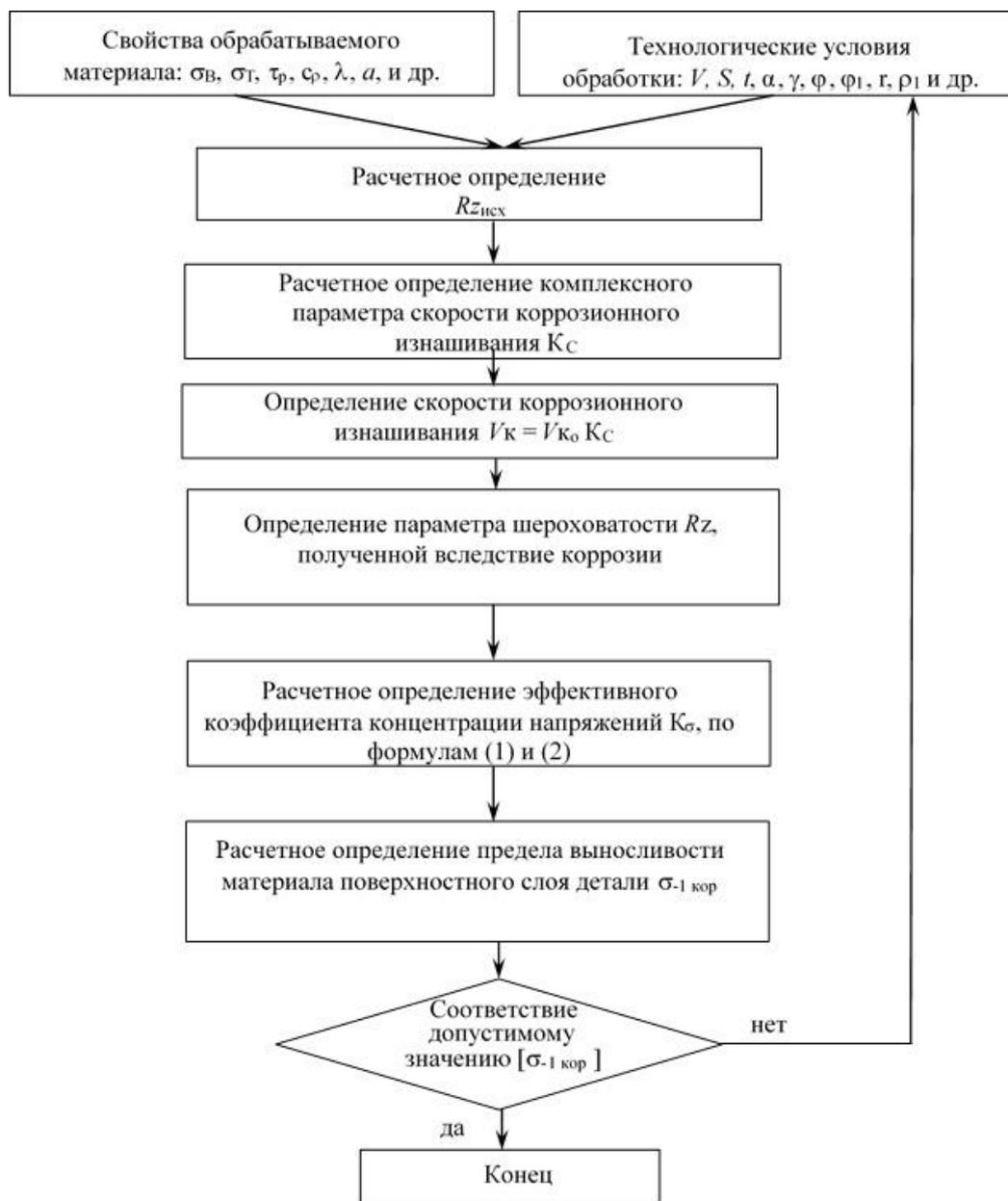


Рисунок 7 – Алгоритм расчетного определения эффективного коэффициента концентрации напряжений во взаимосвязи с технологическими условиями обработки

7) Определяется эффективный коэффициент концентрации напряжений в материале поверхностного слоя детали по формулам (1) и (2).

8) Определяется предел выносливости материала поверхностного слоя детали после коррозии $\sigma_{-1\text{ кор}}$ по формуле $\sigma_{-1\text{ кор}} = \sigma_{-1} / K_\sigma$, где σ_{-1} – предел выносливости исходного материала детали. Если $\sigma_{-1\text{ кор}}$ соответствует допустимому значению, то расчет закончен. Если нет, то необходимо скорректировать технологические условия обработки с целью обеспечения требуемого значения $\sigma_{-1\text{ кор}}$ при заданном периоде эксплуатации детали.

4 Обсуждение и заключение

Установлено, что коэффициент концентрации напряжений в поверхностном слое материала детали при коррозионном воздействии на него возрастает по сравнению с коэффициентом без коррозионного воздействия на величину от 5 до 9 процентов, что существенно при оценке прочностных характеристик детали.

Из режимных параметров процесса обработки на изменение эффективного коэффициента концентрации напряжений наибольшее влияние оказывает подача. Скорость резания в интервале рациональных режимов резания практически не влияет на изменение коэффициента концентрации напряжений в поверхностном слое материала детали.

Существенное влияние на изменение коэффициента напряжений оказывает влияние радиус при вершине резца в плане и радиус округления режущей кромки резца.

Разработанный алгоритм расчетного определения эффективного коэффициента концентрации напряжений во взаимосвязи с технологическими условиями обработки поверхности детали позволяет прогнозировать назначение последних с учетом допустимого значения коэффициента концентрации напряжений.

Список литературы

- 1 Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шор, Г. Б. Иосилевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
- 2 Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М. Несущая способность и расчеты деталей машин на прочность: Руководство и справочное пособие. Изд. 3-е, переработанное и дополненное / Под ред. Серенсена С. В. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
- 3 Петерсон, Р. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1977. – 302 с.
- 4 Елизаветин, М. А. Повышение надежности. Изд. 2-е перабот. и доп. М.: Машиностроение, 1973. – 430 с.
- 5 Сатель Э.А., Елизаветин М. А. Технологические методы повышения качества поверхностного слоя деталей машин. Сборник № 5: «Качество поверхности деталей машин». АН СССР, 1961. – С. 21-26.
- 6 Хевиленд, Р. Инженерная надежность и расчет на долговечность. М.– Л. «Энергия», 1966. – 231 с.
- 7 Безъязычный В. Ф., Клейменов В. В., Плешкун В. В. К вопросу расчетного определения степени коррозионного влияния в процессе эксплуатации на шероховатость обработанной поверхности // Вестник РГАТУ, № 2(65), 2023. – С. 115-121.
- 8 Братухин Л. Я., Гуревич Л. Я. Коррозионная стойкость высокопрочных нержавеющей сталей. – М.: Авиатехинформ, 1999. – 288 с.
- 9 Братухин, А. Г. Технологическое обеспечение высокого качества надежности, ресурса авиационной техники. – М.: Машиностроение, 1966. – Том I. – 550 с.; том II. – 296 с.
- 10 Логан, Х. Л. Коррозия металлов под напряжением. – М.: Металлургия, 1970. – 340с.
- 11 Коррозионная стойкость нержавеющей сталей применительно к авиационной технике // Справочное пособие под ред. Л. Я. Гуревич и А. Д. Жирнова. – М.: ВИАМ, 1988.
- 12 Ву Динь Вуй. Атмосферная коррозия металлов в тропиках. – М.: Наука 1994. – 240 с.
- 13 Розенфельд, И. Л. Атмосферная коррозия металлов. – М.: АН СССР, 1960. – 375 с.
- 14 Карненко, Г. В. Прочность стали в коррозионной среде. Киев, Машгиз, 1963. – 188 с.
- 15 Похмурский, В. И. Коррозионная усталость металлов. М.: Металлургия, 1985. – 207 с.
- 16 Макаров, А. В. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 264 с.
- 17 Безъязычный, В. Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2012. – 320 с.
- 18 Инженерия поверхности деталей / Колл. Авт.; под ред. А. Г. Сулова, М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

19 Федонин, О. Н. Инженерия поверхности детали с позиции ее коррозионной стойкости // Справочник. Инженерный журнал. Приложение № 10. – 2001.– С. 17-19.

20 Суслов А. Г., Дальский А. М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002.– 684 с.

21 Справочник технолога машиностроителя: В 2т / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р, К. Мещерякова – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001.– Т.2.– 944 с.

References

1 Birger I. A. et al. Calculation of the strength of machine parts: Handbook / I. A. Birger, B. F. Shor, G. B. Iosilevich.– 3rd ed., reprint. and additional – М.: Mechanical Engineering, 1979.– 702 p.

2 Serensen S. V., Kogaev V. P., Schneiderovich R. M. Bearing capacity and calculations of machine parts for strength: Manual and reference manual. 3rd edition, revised and supplemented / Ed. Serensen S. V. – М.: Mechanical Engineering, 1975.– 488 p.

3 Peterson R. Stress concentration coefficients.– М.: Mir, 1977.– 302 p.

4 Elizavetin M. A. Improving reliability. Ed. 2nd perabot. and additional М.: Mashinostroenie, 1973.– 430 p.

5 Satel E.A., Elizavetin M. A. Technological methods for improving the quality of the surface layer of machine parts. Collection No. 5: "Surface quality of machine parts". ANSSSR, 1961.– pp. 21-26.

6 Haviland R. Engineering reliability and durability calculation. М.– L. "Energy", 1966.– 231 p.

7 Bezylazny V. F., Kleimenov V. V., Pleshkun V. V. On the issue of the calculated determination of the degree of corrosion effect during operation on the roughness of the treated surface // Bulletin of RGATU, № 2(65), 2023.– Pp. 115-121.

8 Bratukhin L. Ya., Gurevich L. Ya. Corrosion resistance of high-strength stainless steels.– М.: Aviatekhnform, 1999.– 288 p

9 Bratukhin A. G. Technological assurance of high-quality reliability, the resource of aviation equipment. – М.: Mechanical Engineering, 1966. – Volume I.– 550 p.; volume II. – 296 p.

10 Logan H.L. Corrosion of metals under stress. – М.: Metallurgia, 1970.– 340s.

11 Corrosion resistance of stainless steels in relation to aviation technology // Reference manual edited by L. Ya. Gurevich and A.D. Zhirnov.– М.: VIAM, 1988.

12 Wu Dinh Vui. Atmospheric corrosion of metals in the tropics.– М.: Nauka 1994.– 240 p.

13 Rosenfeld I. L. Atmospheric corrosion of metals. – М.: USSR Academy of Sciences, 1960.– 375 p.

14 Karnenko G. V. Strength of steel in a corrosive environment. Kiev, Mashgiz, 1963.–188 p.

15 Pokhmursky V. I. Corrosion fatigue of metals. М.: Metallurgy, 1985.–207 p.

16 Makarov A.V. Optimization of cutting processes. –М.: Mechanical Engineering, 1976.–264 p.

17 Bezjazychnyi V. F. Similarity method in mechanical engineering technology. – М.: Mashino-stroenie, 2012.– 320 p.

18 Engineering of the surface of parts / Coll. Auth.; edited by A. G. Suslov, М.: Mashinostroenie, 2008.– 320 p.

19 Fedonin O. N. Engineering of the surface of a part from the standpoint of its corrosion resistance // Handbook. Engineering magazine. Appendix No. 10 2001.– pp. 17-19.

20 Suslov A. G., Dalsky A.M. Scientific foundations of mechanical engineering technology. М.: Mechanical Engineering, 2002.– 684 p.

21 Handbook of a machine–building technologist: In 2t / edited by A.M. Dalsky, A. G. Suslov, A. G. Kosilova, R, K. Meshcheryakova - 5th ed., reprint. and additional. – М.: Mashinostroye-1, 2001.– Vol.2.– 944 p.