

УДК 620.178.38

Л.В. Морозова¹, М.Р. Орлов¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС
В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-37-48

Методами оптической, растровой электронной и конфокальной лазерной микроскопии исследованы механизмы усталостного и статического эксплуатационных разрушений зубчатых колес из стали 20ХЗМВФ. Проведено статистическое обобщение причин, приводящих к возникновению разрушений в процессе эксплуатации.

Проведено моделирование механизма усталостного разрушения зубчатых колес в условиях действия динамических нагрузок с различным коэффициентом асимметрии цикла нагружения. Установлено, что зарождение усталостной трещины происходит в условиях максимальных сжимающих напряжений.

Ключевые слова: *фрактография, разрушение, шестерня, механическая обработка, усталостное разрушение.*

Mechanisms of fatigue and static operational failure of cogwheels from steel 20kH3MVF are investigated by methods of optical, scanning electron and confocal laser microscopy. Statistical generalization of the reasons leading to the failure in the process of operation is carried out.

Modeling of the mechanism of fatigue failure of cogwheels under dynamic loads with different loading cycle ratio is carried out. It is established that a fatigue crack is initiated in condition of maximum compression stresses.

Keywords: *fractography, failure, gear wheel, cogwheel, machining, fatigue failure.*

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

Введение

Стальные зубчатые колеса (ЗК) работают под нагрузкой [1, 2], являются частью сложных технических систем, таких как газотурбинный двигатель (ГТД), и образование в процессе эксплуатации трещин на их поверхности зачастую приводит к возникновению аварийных ситуаций и разрушению конструкции.

Исследования эксплуатационных разрушений позволяют не только выявить причины их возникновения, но и дать рекомендации по корректировке конструкции и технологии производства, направленные на обеспечение безопасной эксплуатации и увеличение ресурса зубчатых колес [3–9].

Многолетние исследования случаев эксплуатационных разрушений шестерен газотурбинных двигателей (ГТД) позволили провести статистическое обобщение данных и выявить ряд особенностей, приводящих к возникновению трещин усталости и развитию разрушения [10–14].

Чаще всего усталостные трещины развиваются от поверхности фасок со стороны большого или малого модуля, а также от межзубцовых впадин и связаны с производственными дефектами.

Дефекты могут возникать при отклонениях в процессах механической, термической и химико-термической обработки (ХТО). Большую роль

играет также качество сборки готового изделия. Отклонение геометрической формы сопрягаемых поверхностей приводит к неравномерности приложенной нагрузки, перераспределению внутренних напряжений в шестерне, выкрашиванию материала, возникновению контактной усталости. Одним из внешних признаков отклонения геометрической формы является смещение пятна контакта на поверхности зуба.

В качестве производственных дефектов, вызывающих образование усталостных трещин, могут выступать некачественно выполненные:

- шлифование поверхности зуба (шлифовочные прижоги);
- абразивная обработка фасок (грубые риски);
- обработка межзубцовых впадин (вырывы материала, образовавшиеся при фрезеровании, отсутствие радиусов перехода),
- а также нарушение последовательности или применение дополнительных технологических операций.

Материалы и методы

Материалом шестерен является сталь 20ХЗМВФ. Поверхность зубчатого венца шестерен упрочнена методом ХТО по серийной технологии нитроцементации [15, 16] с последующей закалкой в масле после аустенитизации при тем-

пературе 910°C в течение 30 мин, обработкой холодом при температуре -100°C в течение 2 ч и отпуском при температуре 300°C в течение 3 ч.

Требования к механическим свойствам и качеству ХТО приведены в табл. 1, требования к химическому составу – в табл. 2.

В процессе исследований по выявлению причин эксплуатационных разрушений проводился комплексный анализ материала зубчатых колес на соответствие требованиям чертежа и нормативной документации (ТУ14-1-2090-77, ОСТ1.90176-75, ПИ «Химико-термическая обработка сталей» с изменениями №1 от 17.04.2006 г., №2 от 20.02.2008 г., №3 от 05.05.2008 г.), включающий проведение следующих работ:

- визуальный осмотр, фотосъемка представленного ЗК или его фрагментов;
- анализ поверхности ЗК, пятен контакта и межзубцовых впадин с использованием оптического анализа;
- проведение химического анализа на соответствие марке стали;
- проведение фрактографического анализа;
- исследование микроструктуры как сердцевин, так и нитроцементованного слоя ЗК;
- измерение твердости сердцевины, нитроцементованного слоя с определением его глубины.

Металлографические и фрактографические исследования выполнены на оптическом микроскопе DM IRM и растровом электронном микроскопе JSM-6490LV, оснащенный системой энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА).

Микроструктуру и качество химико-термической обработки оценивали на шлифах, изготовленных в поперечном направлении зуба вблизи усталостного разрушения. Микротвердость определяли на микротвердомере DuraScan 80.

Химический состав материала определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре S4 EXPLORER и оптико-эмиссионном спектрометре APL 4460.

Моделирование усталостного разрушения образцов из стали 20Х3МВФ выполнили на резонансной испытательной машине CRACKTRONIC при высокочастотном нагружении с симметричным и асимметричным циклом нагружения в условиях растяжения и сжатия.

Измерение степени шероховатости изломов проводили с помощью конфокального сканирующего лазерного микроскопа OLYMPUS LEXT OLS3100.

Исследование эксплуатационного разрушения зубчатых колес из стали 20Х3МВФ (ЭИ415)

Шестерня №1

Вид шестерни после разрушения приведен на рис. 1, а. Разрезку шестерни для проведения исследований производили по линии А-А (рис. 1, а). Зубья пронумерованы в направлении развития разрушения, начиная от места зарождения усталостной трещины (рис. 1, б, в).

На обеих сторонах зубьев наблюдается смещение пятен контакта к малому модулю (рис. 1, д). В рабочем режиме ГТД контактной поверхностью является выпуклая сторона эвольвентной поверхности зуба. В режиме запуска ГТД контактной является вогнутая поверхность. При анализе материала зубьев методом электронной микроскопии в области пятен контакта на вогнутой поверхности выявлены следы повреждения, такие как наволакивание, локальное налипание и выкрашивание материала, что свидетельствует о высоких контактных нагрузках (рис. 1, е).

При осмотре с помощью бинокулярного мик-

Таблица 1

Требования к механическим свойствам и качеству ХТО

Нормативная документация (ТУ14-1-2090-77, ОСТ1.90176-75)						Требования чертежа			
Направление вырезки образца	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	$K_{CU,2}$ Дж/см ²	Глубина слоя, мм	НВ (диаметр отпечатка, мм)	HRC (сердцевина)	HRC (слой)
	МПа		%						
Продольное	≥ 1100	≥ 900	≥ 10	≥ 55	≥ 70	0,6-1,2	3-3,4	34-43,5	≥ 57
Хордовое	≥ 1100	≥ 900	8,5	48,8	≥ 59				

Таблица 2

Химический состав стали 20Х3МВФ (требования по ТУ14-1-2090-77)

Содержание химических элементов, % (по массе)								
C	Si	Mn	Cr	W	Mo	V	S	P
0,15-0,2	0,17-0,37	0,25-0,5	2,8-3,3	0,3-0,5	0,35-0,55	0,6-0,85	<0,025	<0,03

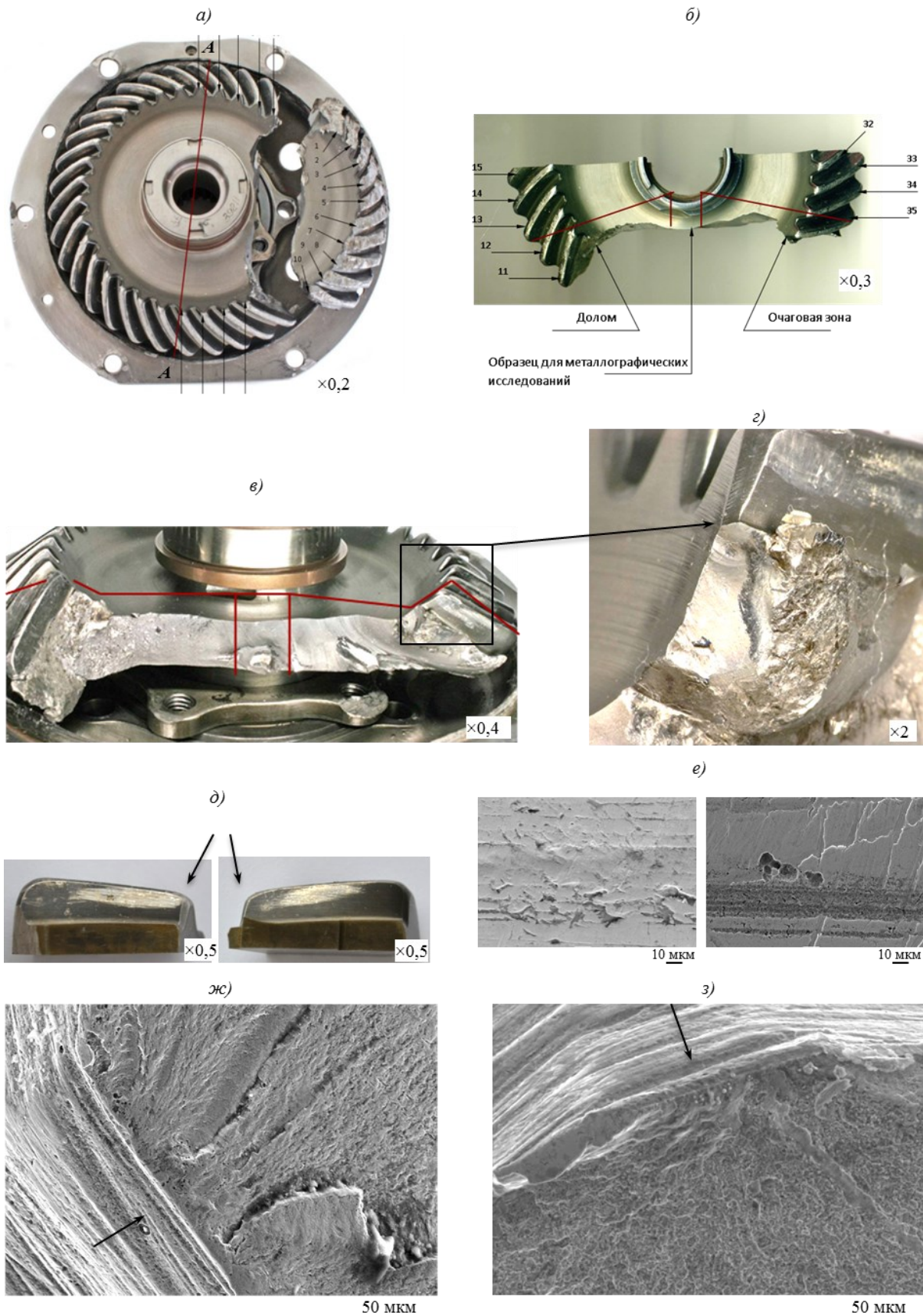


Рис. 1. Разрушение шестерни №1:
 а – общий вид ЗК; б, в – схема разрезки; г – общий вид излома; д – смещение пятен контакта к малому модулю; е – выкрашивания в пятне контакта; ж – основной очаг по риске; з – вторичная трещина по риске

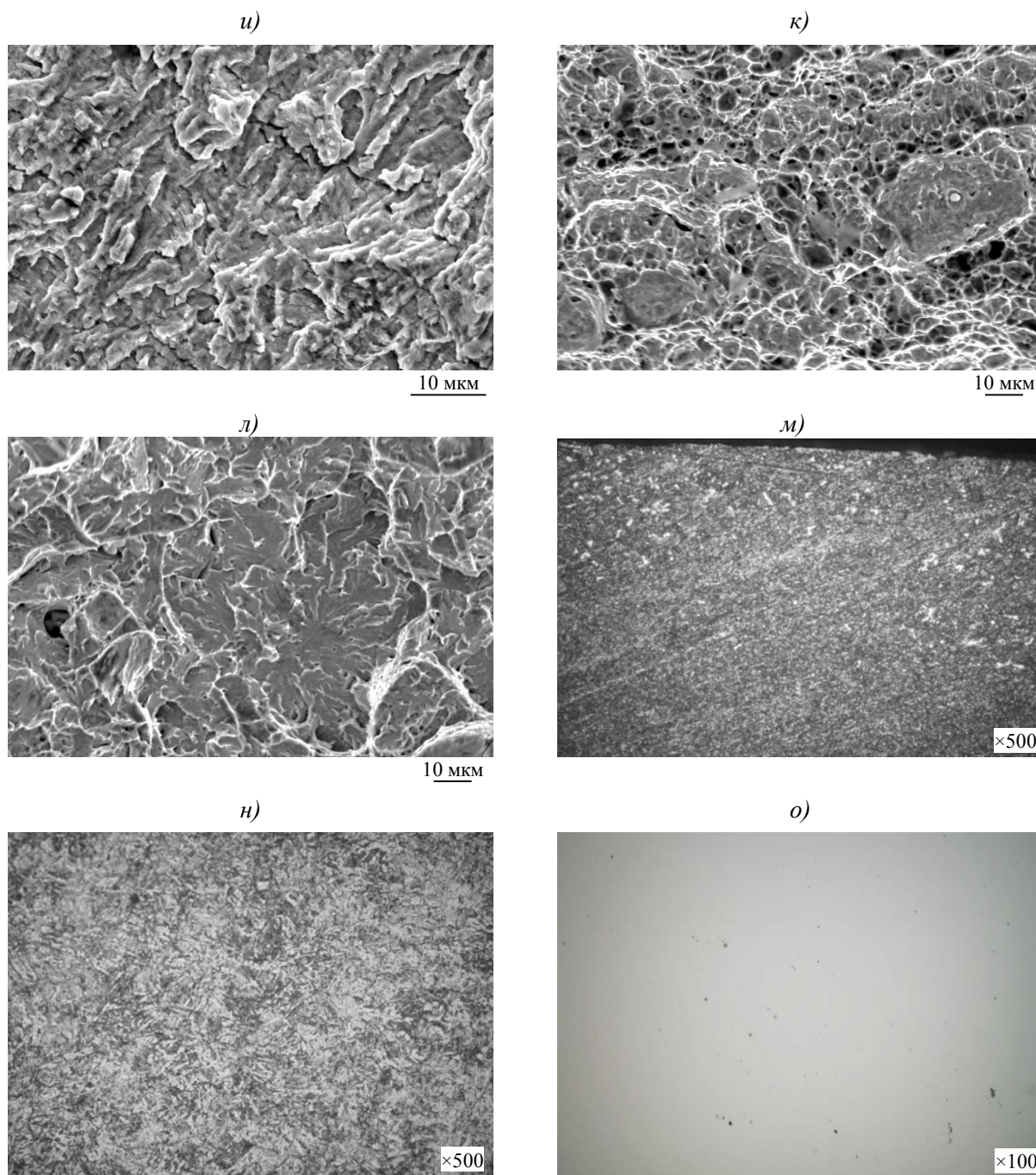


Рис. 1 (продолжение). Разрушение шестерни №1:
u – строение излома в усталостной зоне; *k* – ямочный рельеф в долоте; *l* – фасетки квазискола в долоте;
m – микроструктура нитроцементованного слоя у поверхности зуба; *n* – микроструктура сердцевины (мартенсит); *o* – загрязненность неметаллическими включениями (1 балл)

роскопа выявлены вторичные трещины в межзубцовых впадинах. В местах снятия фаски наблюдаются грубые риски от механической зачистки.

Фрактографический анализ показал, что основной очаг разрушения развивался от риски в месте снятия фаски по межзубцовой впадине (рис. 1, *з, ж*). Вторичные трещины также образовывались по рискам от абразивной зачистки, ориентированным в осевой области (рис. 1, *з*). Глубина таких рисок достигает 17 мкм. Разрушение усталостное, развивается веерообразно, наблюдаются макролинии остановки трещины и усталостные бороздки в изломе (рис. 1, *и*). Долгом имеет смешанное строение – как с образованием ямочного рельефа (рис. 1, *к*), так и с формированием фасеток квазискола (рис. 1, *л*).

По результатам химического анализа состав материала шестерни соответствует стали марки 20Х3МВФ (ЭИ415) согласно требованиям чертежа и нормативной документации (ТУ14-1-2090–77).

Глубина нитроцементованного слоя на эвольвентной поверхности зуба составляет 0,95–1,1 мм. Твердость нитроцементованного слоя составляет ≥ 60 HRC, твердость сердцевины шестерни 36,5 HRC, что соответствует техническим требованиям чертежа и нормативной документации.

Микроструктура нитроцементованного слоя шестерни представляет собой мелкодисперсный (бесструктурный) мартенсит и мелкие карбиды (рис. 1, *м*). Микроструктура сердцевины шестерни – малоуглеродистый мартенсит отпуска (рис. 1, *н*). Загрязненность металла неметаллическими включениями составляет 1 балл по ГОСТ 1778 (рис. 1, *о*).

На основании проведенных исследований установлено, что усталостное разрушение развивается от поверхностных дефектов в виде рисок от абразивного инструмента глубиной ~17 мкм, ориентированных в направлении межзубцовой впадины в зоне фаски со стороны малого модуля.

Причиной образования очага усталостного разрушения зубчатого колеса является сочетание факторов:

- абразивная зачистка фасок со стороны малого модуля, выполняемая после операции ХТО;
- смещение контактного пятна на вогнутой поверхности зуба в сторону малого модуля вследствие отклонения геометрической формы сопрягаемых поверхностей.

Шестерня №2

В ходе эксплуатационного разрушения произошло разделение шестерни на два фрагмента (рис. 2, *а, б*).

При анализе поверхности ЗК с помощью оптического микроскопа выявлены трещины в 12 межзубных впадинах отделившегося фрагмента (рис. 2, *в, г*). На поверхности фасок выявлены следы абразивной зачистки, грубые риски (рис. 2, *д*). По торцам отделившейся части с од-

ной стороны наблюдается усталостный излом с визуально различимыми макролиниями остановки трещины (рис. 2, *е*).

Осмотр пятен контакта на рабочей поверхности шестерни показал неравномерное их расположение. Вблизи мест разрушения на отделившемся фрагменте пятна контакта смещены в сторону малого модуля. На поверхности пятен контакта наблюдается значительная выработка материала (риски, выкрашивания), что свидетельствует о действии высоких контактных напряжений.

Фрактографический анализ показал, что разрушение во всех случаях усталостное, развивается от грубых рисок в области фаски (рис. 2, *ж–и*), вблизи угла перехода от фаски к поверхности зуба. В зоне циклического развития трещины наблюдаются усталостные бороздки (рис. 2, *к*). Множественное зарождение трещин свидетельствует о действии высокой нагрузки. В отделившемся фрагменте выявленные трещины развивались при более высокой нагрузке, что подтверждает их вторичность (увеличение нагрузки вследствие ослабления сечения при развитии первичной трещины). В зоне статического разрушения излом имеет смешанное строение, наблюдается как ямочный рельеф (рис. 2, *л*), так и фасетки квазискола (рис. 2, *м*).

По результатам химического анализа состав материала шестерни соответствует стали марки 20Х3МВФ согласно требованиям чертежа и нормативной документации (ТУ14-1-2090–77).

Микроструктурным анализом установлено, что твердость и глубина слоя, а также твердость сердцевины соответствуют качественно выполненной ХТО. Твердость нитроцементованного слоя составляет ≥ 60 HRC. Глубина слоя составляет 0,8–0,85 мм, твердость сердцевины 42 HRC, что соответствует техническим требованиям чертежа и нормативной документации.

Микроструктура слоя удовлетворительная и представляет собой мелкодисперсный мартенсит и мелкие карбиды (рис. 2, *н*). Микроструктура сердцевины – малоуглеродистый мартенсит (рис. 2, *о*), загрязненность неметаллическими включениями не превышает 1 балла по шкале ГОСТ 1778.

На основании проведенных исследований установлено, что возникновению усталостного разрушения способствовала совокупность факторов: отклонение геометрической формы сопрягаемых поверхностей, вызвавшее смещение пятен контакта в сторону малого модуля, и наличие концентраторов напряжений в виде глубоких рисок в местах грубой зачистки фасок.

Шестерни №3 и №4

Разрушение шестерен произошло с отделением фрагментов. При визуальном осмотре зубчатых колес выявлено смещение пятен контакта в сторону малого модуля (рис. 3, *а, б*).

В ходе проведения комплексного исследова-

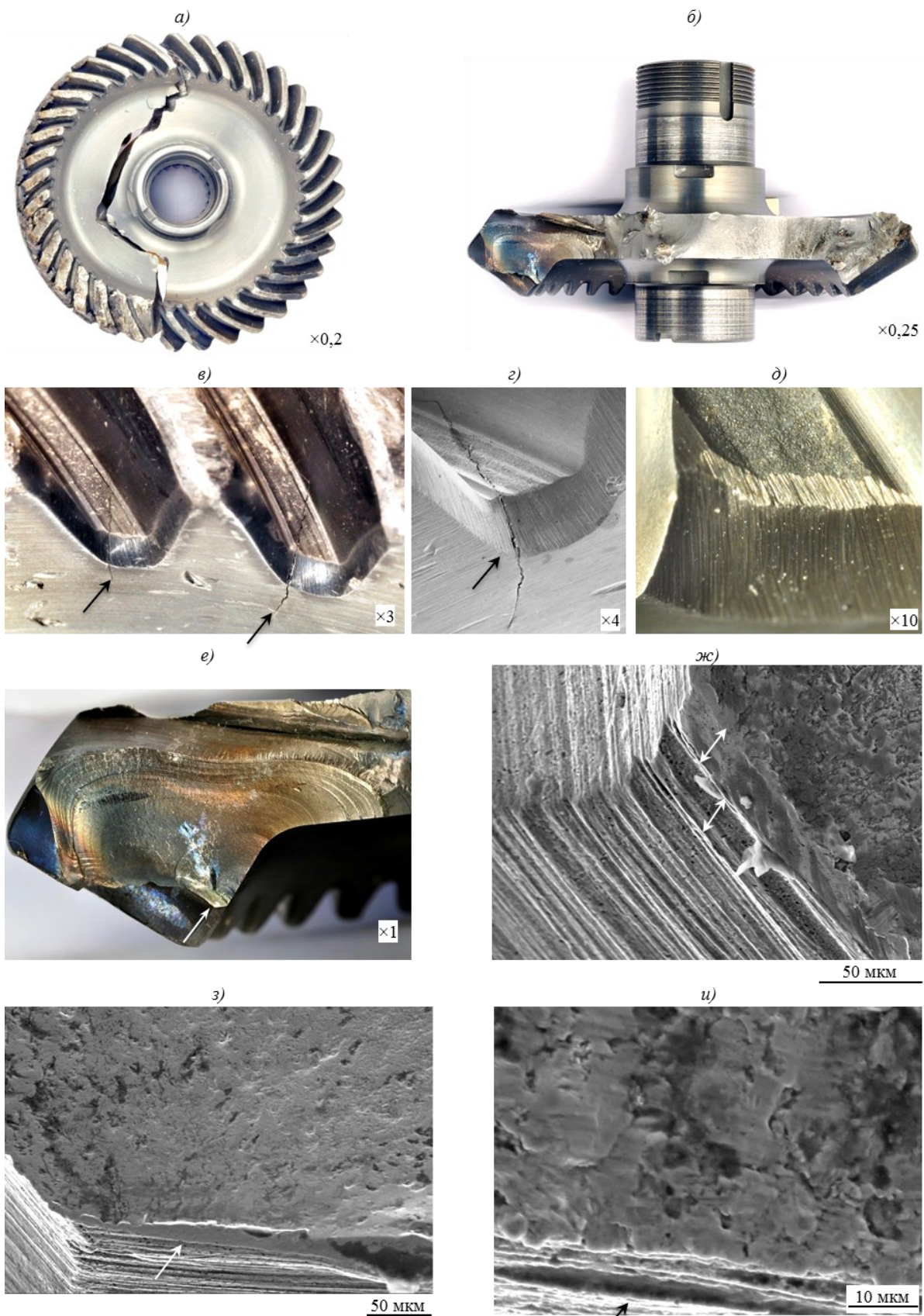


Рис. 2. Разрушение шестерни №2:
 а, б – общий вид ЗК; в, г – трещины по межзубовым впадинам; д – риски от абразивной зачистки; е – усталостный излом; ж – риска в очаге; з, и – риски во вторичных очагах разрушения

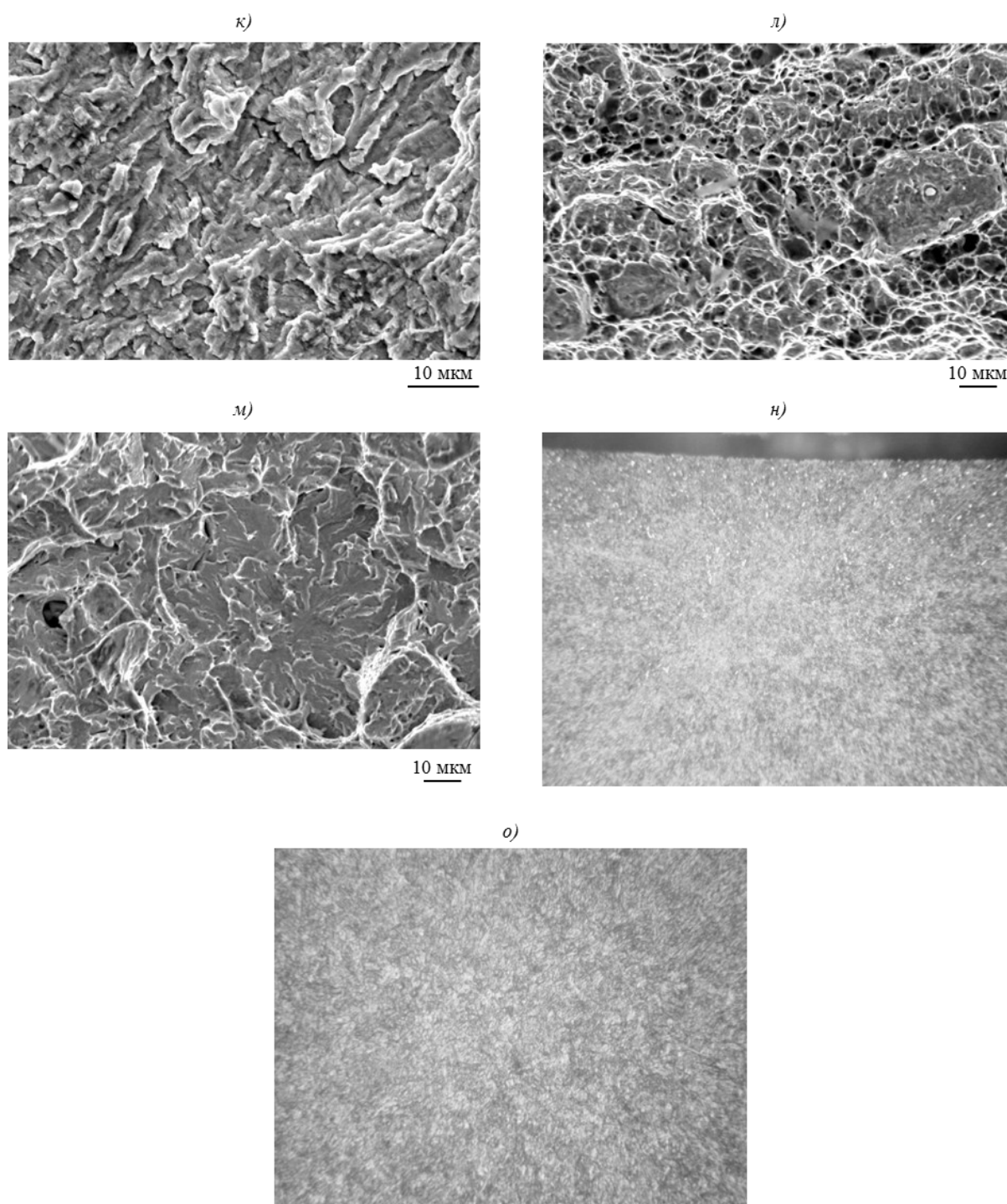


Рис. 2 (продолжение). Разрушение шестерни №2:
к – строение излома в усталостной зоне; л – ямочный рельеф в доломе; м – фасетки квазискола в доломе;
н – микроструктура нитроцементованного слоя у поверхности зуба; о – микроструктура сердцевины (мартенсит)

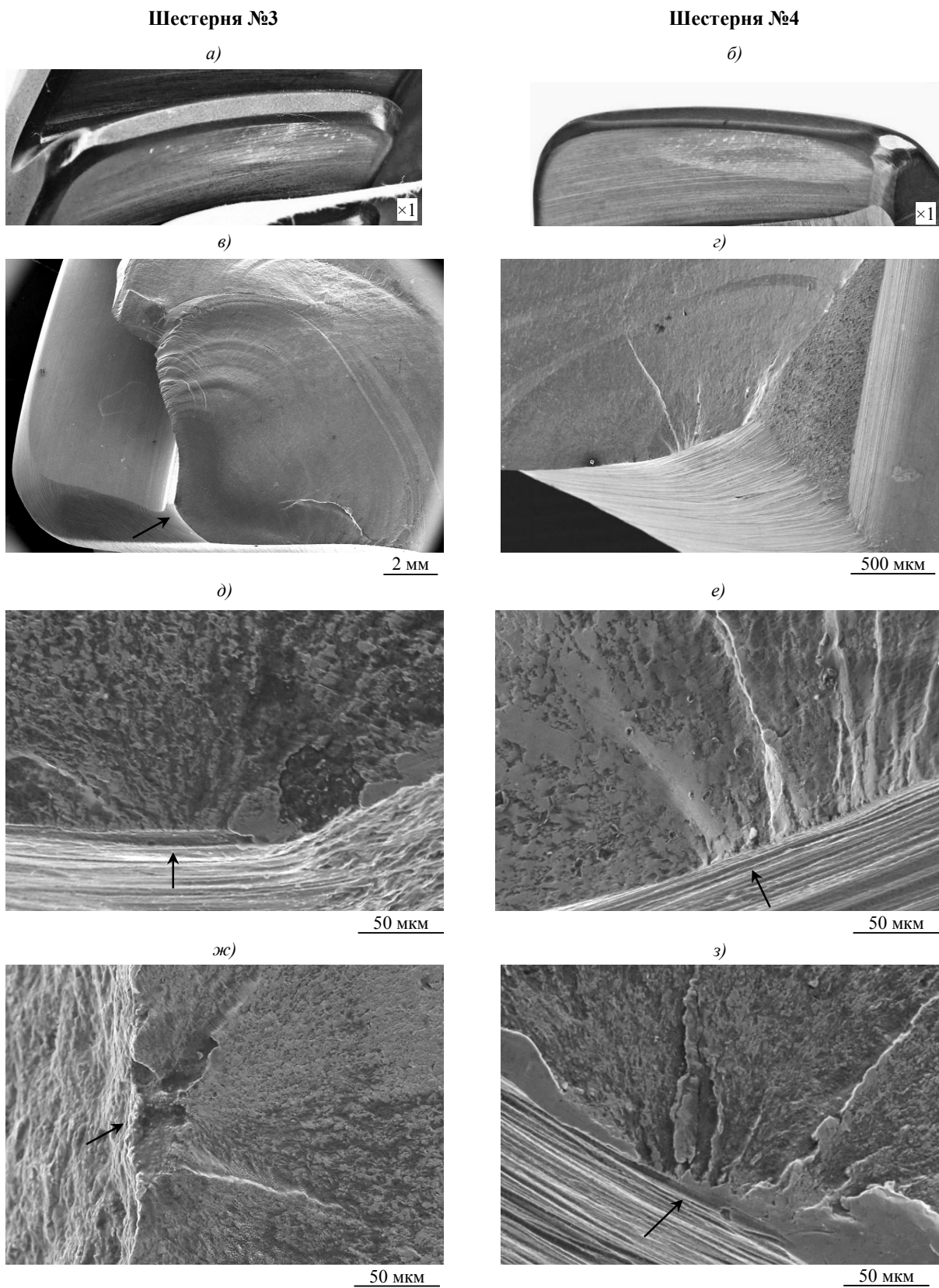


Рис. 3. Разрушение шестерен №3 (а, в, д, ж) и №4 (б, г, е, з):
 а, б – смещение пятен контакта к малому модулю; в, г – первичные очаги разрушения; д, е – очаги разрушения от рисок; ж – вторичный очаг разрушения от вырыва материала; з – вторичный очаг от риски

ния получено, что химический состав, твердость, микроструктура, глубина и качество цементованного слоя соответствуют техническим требованиям чертежа и нормативной документации.

Фрактографический анализ выявил наличие грубой зачистки фаски и развитие очагов разрушения от глубоких рисок и дефектов поверхности межзубцовых впадин, таких как вырывы материала при фрезеровании (рис. 3, в–з). Таким образом, как и в случае шестерни №2, разрушение вызвано отклонением геометрической формы сопрягаемых поверхностей, повлекшим за собой усиление нагрузки в области малого модуля и образование усталостных трещин на рисках от абразивной зачистки в зоне фаски.

Моделирование механизма усталостного разрушения стали марки 20Х3МВФ

Для моделирования механизма усталостного разрушения зубчатых колес в условиях действия динамических нагрузок с различным коэффициентом асимметрии цикла нагружения (включая условия сжатия), на электродинамической установке CRACKTRONIC испытаны образцы из стали 20Х3МВФ сечением 10×10 мм с V-образным надрезом глубиной 2 мм после термической обработки по серийному режиму для конических шестерен. Испытания проводили по схеме четырехточечного изгиба. Расчет действующих напряжений в вершине V-образного надреза с радиусом $r=0,25$ мм в зависимости от величины изгибающего момента в процессе усталостных испытаний выполнен с помощью программного комплекса электродинамической установки CRACKTRONIC.

Для исследований выбран резонансный электродинамический способ усталостных испытаний, позволяющий выбирать частоту резонансных колебаний [17–20]. Наличие контроля

нагрузки и частоты нагружения резонансных систем последних разработок позволяет проводить моделирование условий зарождения и развития усталостных трещин в высокопрочных конструкционных материалах в диапазоне частот вращения ротора газотурбинного двигателя.

Для определения диапазона динамических нагрузок при испытаниях образцов на изгиб, задаваемых величиной изгибающего момента, проанализированы условия работы редуктора при запуске ГТД и в режиме привода электрогенератора. В результате анализа установлено, что максимальный крутящий момент (эквивалент изгибающего момента при испытании образцов) возникает при работе редуктора в режиме запуска ГТД. С ростом оборотов ротора компрессора высокого давления (КВД) крутящий момент снижается. При запуске ГТД величина передаваемого редуктором крутящего момента, создающего сжимающие напряжения в зоне зарождения усталостной трещины, более чем вдвое превышает величину крутящего момента при работе редуктора в режиме привода электрогенератора, создающего растягивающие напряжения.

Для моделирования механизма усталостного разрушения образцов из стали 20Х3МВФ выбраны значения коэффициента асимметрии цикла нагружения R (отношение величины минимального значения напряжения в цикле нагружения к максимальному значению) в диапазоне от -10 до $+10$. Частота нагружения образцов находилась в диапазоне значений 110–130 Гц, что соответствует частоте нагружения зубьев конической шестерни редуктора при скорости вращения ротора компрессора высокого давления 5600–6700 об/мин.

Параметры динамического нагружения и результаты усталостных испытаний образцов из стали 20Х3МВФ представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты усталостных испытаний образцов из стали 20Х3МВФ с различным размахом номинальных напряжений в зоне зарождения усталостной трещины и различными значениями коэффициента асимметрии цикла нагружения R

Условный номер образца	Действующие напряжения в зоне зарождения трещины, МПа			Коэффициент асимметрии цикла нагружения R	Количество циклов нагружения N	Шероховатость поверхности излома R_a
	σ_{\max}	σ_{\min}	$\Delta\sigma$			
1	+893	+268	625	+0,3	$1,9 \cdot 10^4$	2,09
2	+694	+69	625	+0,1	$3,5 \cdot 10^4$	1,748
3	+555	+55	500	+0,1	$8,5 \cdot 10^4$	1,934
4	+313	-312	625	-1	$2,7 \cdot 10^5$	2,474
5	+250	-250	500	-1	$2,0 \cdot 10^7$	–
6	+74	-736	810	-10	$9,8 \cdot 10^5$	1,760
7	0	-1000	1000	$-\infty$	$2,9 \cdot 10^6$	1,270
8	-120	-1185	1065	+10	$2,6 \cdot 10^6$	1,180

Примечание. Образец 5 после испытаний на базе $2 \cdot 10^7$ циклов не разрушился, образцы 7 и 8 имели трапециевидное сечение.

Для увеличения номинальных напряжений при испытаниях образцов в области сжатия и моделирования абразивной обработки фасок в зоне зарождения усталостных трещин на конических шестернях, на образцах 7 и 8 выполнены боковые надрезы абразивным кругом, в результате чего исследуемое сечение приобрело форму трапеции. Для определения амплитудных напряжений в зоне V-образного надреза, для образцов 7 и 8 выполнен расчет момента сопротивления трапециевидного сечения и рассчитаны амплитудные значения напряжений для заданных значений изгибающего момента по классическим формулам механики [21]:

$$\sigma_{\max} = K_{\sigma} M_{\text{н}} / W_z,$$

где K_{σ} – коэффициент концентрации напряжений в вершине V-образного надреза; $M_{\text{н}}$ – изгибающий момент; W_z – момент сопротивления образца трапециевидного сечения для меньшего основания:

$$W_z = \frac{h^2 (b^2 + 4bb_1 + b_1^2)}{12(2b + b_1)},$$

где h – высота трапециевидного сечения; b – большее основание; b_1 – меньшее основание.

Испытания образцов прекращали при появлении трещин, что соответствовало изменению частоты колебаний более чем на 0,01%. После усталостных испытаний образцы с трещинами разрушены на маятниковом копре. Вскрытые изломы усталостного разрушения исследовали методами оптической, растровой электронной и конфокальной сканирующей лазерной микроскопии (измерение степени шероховатости излома R_a).

Результаты усталостных испытаний показали, что с переходом в область преимущественного сжатия в цикле динамического нагружения усталостная трещина в стали 20Х3МВФ может не только зародиться, но и развиваться в плоскости, ориентированной перпендикулярно вектору действующей нагрузки. Снижение величины статической составляющей $(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})/2$ при постоянной величине размаха напряжений $\Delta\sigma$ приводит к повышению трещиностойкости стали 20Х3МВФ, выражающемуся в увеличении количества циклов N до момента обнаружения усталостной трещины по отклонению резонансной частоты на 0,01% (например, образцы 1, 2 и 4).

Фрактографический анализ изломов (рис. 4) образцов из стали 20Х3МВФ выявил ряд особенностей, отличающих морфологию поверхности усталостного разрушения в условиях преимущественного сжатия ($R=+10$; $-\infty$; -10) от морфологии поверхности усталостного разрушения в условиях симметричного цикла нагружения ($R=-1$) и преимущественного растяжения ($R=+0,3$). Изменяется форма фронта развития усталостной трещины и общая шероховатость излома. Шероховатость (R_a) излома образцов, испытанных в условиях преимущественного растяжения, в среднем в

1,5 раза превышает значения R_a для образцов, испытанных в условиях преимущественного сжатия.

Результаты

В результате выполненных исследований, сочетая моделирование усталостного разрушения в условиях как преимущественного растяжения, так и преимущественного сжатия с фрактографическим анализом на электронном микроскопе, установлено, что зарождение и развитие усталостных трещин в межзубцовых впадинах конических шестерен центрального привода из стали 20Х3МВФ происходит в условиях преимущественного сжатия на стадии запуска ГТД.

Наличие сжимающих напряжений в упрочненном нитроцементованном поверхностном слое, достигающих по данным рентгеноструктурного анализа значений $\sim(400-700)$ МПа, увеличивает величину суммарных амплитудных напряжений, что с учетом геометрических концентраторов напряжений может привести к достижению предела текучести стали 20Х3МВФ в условиях сжатия.

По результатам комплексных исследований разработаны рекомендации:

- для исключения случаев смещения пятна контакта подбирать комплекты зубчатых колес из стали 20Х3МВФ по результатам обмеров профилей зуба с последующим расчетом эксплуатационных нагрузок методом конечных элементов;
- для исключения возникновения концентраторов напряжений в виде малых радиусов сопряжения поверхностей, подвергающихся ХТО, фаску со стороны малого и большого модулей заменить на модифицированный радиус;
- для исключения возникновения продольных рисок на поверхности модифицированных радиусов, профиль модифицированных радиусов выполнять абразивным инструментом с осью вращения, ориентированной в направлении межзубцовой впадины;
- на операции финишного шлифования выполнять чистовую шлифовку профиля зуба, включая межзубцовую впадину.

Заключение

Методами оптической и растровой электронной микроскопии исследованы случаи эксплуатационных разрушений зубчатых колес из стали 20Х3МВФ (ЭИ415).

В результате выполненных исследований установлено, что во всех случаях эксплуатационное разрушение шестерен центрального привода ГТД имеет усталостный характер. Зарождение и развитие усталостных трещин происходит на стадии запуска ГТД в условиях действия сжимающих напряжений.

Очаговыми зонами усталостного разрушения являются геометрические концентраторы напряжений – кромки фасок в местах сопряжения дна межзубцовой впадины и торца зубчатого венца, а

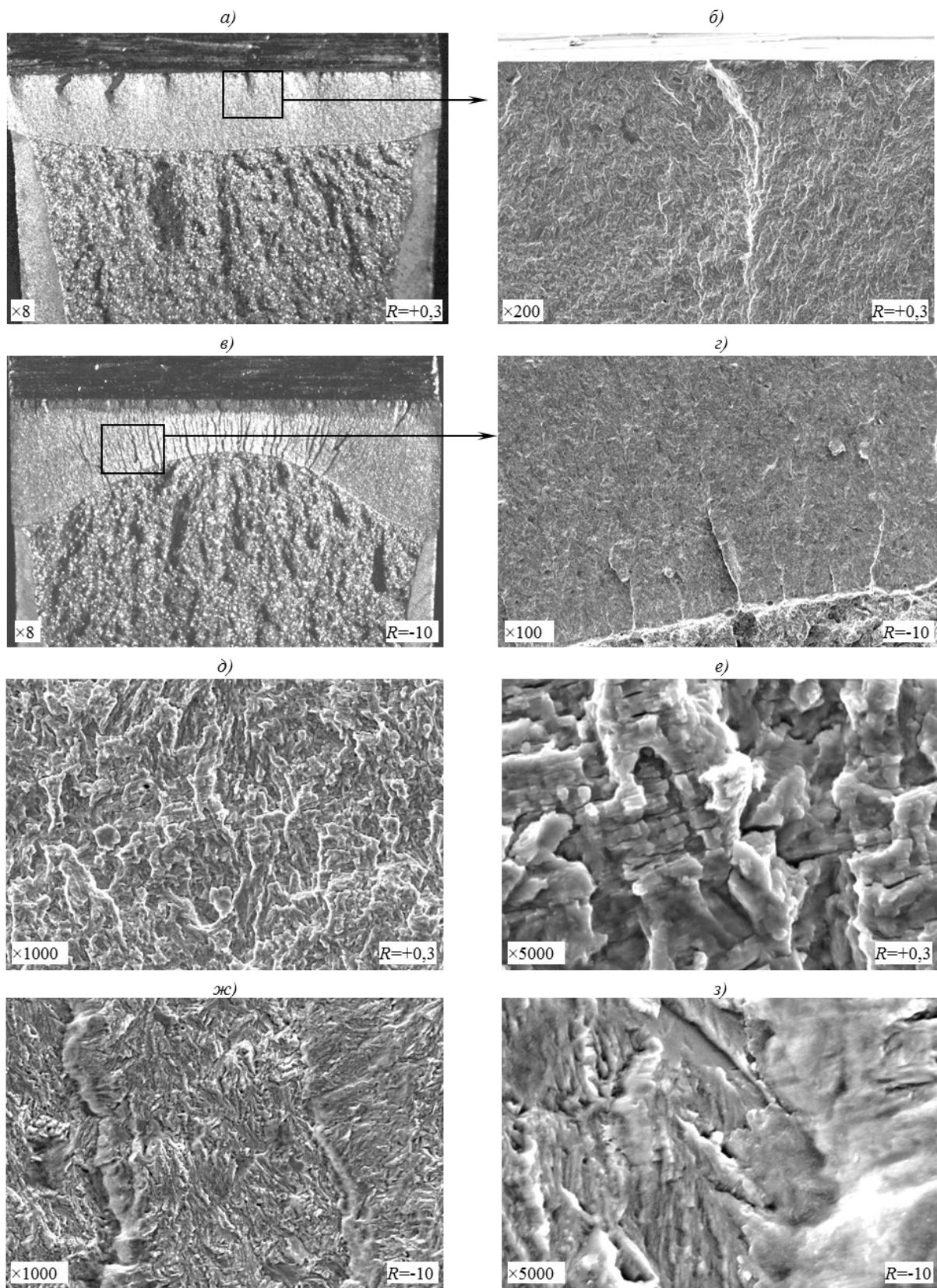


Рис. 4. Усталостное разрушение образцов с различным коэффициентом асимметрии цикла нагружения R :
 а, б – усталостное разрушение образца №1 – преимущественное растяжение ($\Delta\sigma=625$ МПа, $R=+0,3$); в, г – усталостное разрушение образца №6 – преимущественное сжатие ($\Delta\sigma=810$ МПа, $R=-10$); д, е – строение усталостной трещины, развивавшейся в условиях преимущественного растяжения; ж, з – строение усталостной трещины, развивавшейся в условиях преимущественного сжатия

также шлифовочные риски, ориентированные вдоль направления развития усталостных трещин.

Установлено, что значительную роль в возникновении эксплуатационных разрушений играет отклонение геометрической формы сопрягаемых поверхностей. Это приводит к смещению пятен контакта, неравномерности приложенной нагрузки и перераспределению внутренних напряжений в шестерне.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии №14.595.21.0002 от 22.08.2014 г., уникальный идентификатор №RFMEFI59514X0002, с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания ФГУП „ВИАМ”».

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарасенко Л.В., Титов В.И., Уткина А.Н. Свойства и фазовый состав высокоуглеродистой стали для зубчатых колес авиационной техники //Металлургия машиностроения. 2012. №3. С. 10–14.
2. Цементуемая сталь: пат. 1477771 СССР; заявл. 05.10.87; опубл. 07.05.89. Бюл. №17.
3. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Морозова Л.В. Исследование усталостного разрушения конических шестерен редуктора центрального привода газотурбинного двигателя, изготовленных из стали 20Х3МВФ //Деформация и разрушение материалов. 2014. №7. С. 18–26.
4. Пахомова С.А. Совершенствование технологии поверхностного упрочнения шестерен из высокопрочных сталей //Тяжелое машиностроение. 2009. №10. С. 35–38.
5. Семенов М.Ю., Демидов П.Н., Нелюб В.А. Оптимизация технологического процесса вакуумной цементации зубчатых колес из теплостойкой стали с целью повышения циклической прочности //Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. №2. С. 69–73.
6. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России //Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
7. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
8. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
9. Громов В.И., Курпякова Н.А., Седов О.В., Коробова Е.Н. Вакуумная и ионно-плазменная химико-термическая обработка ответственных деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 147–156.
10. Баранов А.В., Вагнер В.А., Тарасевич С.В., Баранова Ю.А., Пономарева А.Н. Проблема оценки износа сопряжений зубчатых колес транспортных машин энергетического оборудования //Ползуновский вестник. 2010. №1. С. 99–105.
11. Тишаев С.И., Орлов М.Р., Колесников В.А. О природе «бейнитной» хрупкости вторичнотвердеющих сталей //Известия АН СССР. Металлы. 1985. №4. С. 143–149.
12. Тишаев С.И., Орлов М.Р., Дегтярев В.Н. Влияние никеля и марганца на «бейнитную» хрупкость вторичнотвердеющих Cr–Mo–V сталей //Известия АН СССР. Металлы. 1986. №1. С. 157–164.
13. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Громов В.И. Замедленное разрушение стали 38ХНЗМА в процессе длительной эксплуатации //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 5–12.
14. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Громов В.И. Развитие механизмов водородной и бейнитной хрупкости конструкционной стали в процессе эксплуатации крупногабаритных конструкций //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 88–93.
15. Способ химико-термической обработки деталей из конструкционных сталей: пат. 2358019 Рос. Федерация; заявл. 23.10.07; опубл. 10.06.09. Бюл. №16.
16. Банас И.П., Морозова Л.В., Коробова Е.Н., Седов О.В. Остаточные сжимающие напряжения и дефекты слоев, упрочненных химико-термической обработкой //Металлург. 2013. №7. С. 66–68.
17. Ерасов В.С., Нужный Г.А. Жесткий цикл нагружения при усталостных испытаниях //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 35–40.
18. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
19. Орлов М.Р. Стратегические направления развития Испытательного центра ФГУП «ВИАМ» //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 387–393.
20. Ерасов В.С., Нужный Г.А., Гриневиц А.В., Терехин А.Л. Трещиностойкость авиационных материалов в процессе испытания на усталость //Труды ВИАМ. 2013. №10. Ст. 06 (viam-works.ru).
21. Трошенко В.Т., Красовский А.Я., Покровский В.В., Сосновский Л.А., Стрижало В.А. Сопrotивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие. Часть 1. К.: Наукова думка. 1993. 288 с.