

Влияние длительности и режимов нагружения на состояние зубчатых колес вертолетных трансмиссий при работе в условиях масляного голодания

Л.А. ТИМОХИНА

(ФАУ «Авиационный регистр
Российской Федерации»,
Москва),

В.Г. АНАНЬЕВА,

С.Г. ГУКАСЯН
(ЦИАМ им. П.И. Баранова,
Москва),

Д.В. НЕДЕЛЬКО,

д-р техн. наук
(ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского,
Жуковский)
latimokhina@ciam.ru

Проведено экспериментальное исследование влияния длительности режимов нагружения и величин нагрузок на состояние зубчатых колес агрегатов вертолетных трансмиссий при работе в условиях масляного голодания. Рассмотрены результаты лабораторных исследований зубчатых колес до и после испытаний в условиях масляного голодания при имитации различных профилей аварийной посадки вертолета после срабатывания сигнализации о потере давления в системе смазки. Определено влияние нагрузок и длительности нагрузок на характер износа при испытаниях зубчатых колес в условиях масляного голодания. Предложены рекомендации по проведению сертификационных испытаний при имитации отказа системы смазки редуктора вертолета.

Редуктор вертолета, зубчатые колеса, масляное голодание, износ, эксплуатационная надежность, сертификация

Согласно статистическим данным наибольшая доля разрушений особо ответственных элементов конструкции вертолетов в эксплуатации [1] приходится на агрегаты трансмиссии вертолета. В процентном отношении эта доля составляет около 39 %, превышая долю разрушений деталей двигателей (22,7 %), силовой конструкции вертолета в целом (29,1 %) и прочих систем (9,4 %). Обеспечению безопасности конструкции агрегатов трансмиссии вертолета и их эксплуатационной надежности должно уделяться особое внимание, в связи с чем проводятся различные стендовые и натурные испытания, расчеты и другие исследования. Специфика обеспечения безопасности агрегатов трансмиссии вертолета связана с комплексным подходом, включающим конструктивную прочность и долговечность деталей агрегатов трансмиссии вертолета, надежную работу системы смазки этих деталей и мониторинг их состояния в процессе эксплуатации с целью своевременного выявления возможных предотказных состояний. Направление исследований по конструктивной долговечности деталей, например зубчатых колес агрегатов трансмиссии вертолета, представлено в работе [2]. Направления исследований систем мониторинга агрегатов трансмиссии вертолета рассмотрены в работах [3, 4].

Долговечность деталей агрегатов трансмиссии вертолета определяется также стабильностью характеристик смазочных масел и надежностью работы системы смазки. В работе [5] выполнена оценка времени работоспособности штатного масла для авиационных газотурбинных двигателей и редукторов вертолетов. Однако обеспечение безопасности агрегатов трансмиссии вертолета отдельно по каждому направлению не может гарантировать полную безопасность вертолета в целом, поскольку любой возможный отказ системы смазки агрегатов трансмиссии вертолета очень быстро приводит к масляному голоданию работающих под нагрузкой деталей и их разрушению.

В настоящее время проводятся исследования работы агрегатов трансмиссии вертолета в условиях отказа системы смазки, что связано, во-первых, с изменением требований Авиационных правил [6] и их зарубежных аналогов [7], во-вторых, с изменением процедур и методов установления соответствия этим правилам из-за ряда авиационных происшествий (в том числе с катастрофическими последствиями), произошедших с сертифицированными конструкциями за рубежом.

На территории Российской Федерации до настоящего момента отсутствовал какой-либо нормативно-технический документ, регламентирующий порядок испытаний трансмиссий винтокрылых аппаратов на отказ системы смазки. Для подтверждения соответствия принимались методики согласно методическим рекомендациям АМС-29 и АС 29-2С [8] к нормам летной годности, действующим на территории Европейского союза и США [8]. Однако данные рекомендации имеют следующие недостатки: обоснование выбора наиболее тяжелого по последствиям для трансмиссии полетного профиля и выбора стендовой

системы, обеспечивающей достаточную репрезентативность; обоснование величин штрафного времени; обоснование величины коэффициента достоверности и выбора дополнительного модуля испытаний и др.

Составление принципиально иных, отличных от подходов Агентства безопасности полетов Европейского союза (EASA) и Федерального управления гражданской авиации США методов определения соответствия осложнит процедуру валидации российской техники за рубежом и зарубежной техники в Российской Федерации.

Таким образом, разрабатываемый документ должен удовлетворять правилам и приемлемым методам определения соответствия, принятым за рубежом, при этом должен быть более однозначным, учитывающим особенности авиационной промышленности Российской Федерации.

Все указанные проблемы прямо или косвенно влияют на итоговое время проведения испытаний в подтверждение тридцатиминутной работоспособности трансмиссии в условиях отказа системы смазки.

Проблема обоснования наиболее тяжелого по последствиям для трансмиссии полетного профиля подробно разбиралась при разработке действующего АМС. Согласно исследованиям департамента Transport Canada (Канада) требовалась замена последних шести минут испытаний, имитирующих работу на наиболее эффективном режиме и посадку без снижения по-вертолетному, на более реалистичный профиль полета, имитирующий снижение, торможение перед зависанием и посадку по-вертолетному, несмотря на более низкие номинальные нагрузки. Предложение было основано на рекомендации многих разработчиков агрегатов трансмиссии о минимизации изменений мощности в условиях масляного голодания и напрямую связано с выбором стендовой системы, обеспечивающей достаточную репрезентативность. В реальных условиях, при отказе системы смазки, снижение и посадка, а также переходы с режима на режим осуществляются через органы продольного и поперечного управления и за счет изменения хода педалей путевого управления непосредственно летчиком, а привод трансмиссии осуществляется за счет одного или нескольких газотурбинных двигателей, в то время как практически все сертификационные испытания в условиях масляного голодания как за рубежом, так и в Российской Федерации проводились на стендах с электродвигателем с более плавной системой управления. Забросы и провалы крутящих моментов (и оборотов), особенно на переходных режимах, вызванные несовершенством системы управления вертолета, могут превышать номинальные значения моментов на наиболее нагруженных установившихся режимах, что с учетом прямого влияния крутящего момента на температуру может оказаться критичным для трансмиссии и воздушного судна в целом.

Таким образом, возникла необходимость проведения испытаний в условиях масляного голодания зубчатых колес по различным полетным профилям в условиях отказа системы смазки с учетом ожидаемых условий эксплуатации, рельефа, назначения вертолета и др. Оценка состояния зубчатых колес после таких испытаний позволит определить наиболее тяжелый по последствиям профиль завершения полета и посадки, который необходимо использовать при сертификационных испытаниях агрегатов трансмиссии вертолета.

В целях оценки влияния нагруженности и длительности испытаний в условиях масляного голодания на состояние зубчатых колес были проведены испытания, состоящие из четырех этапов. Первый этап испытаний заключался в проверке работоспособности зубчатой передачи и оценке рабочих характеристик при ее нагружении в соответствии с реальным полетным профилем, полученным по результатам летных испытаний вертолета. Поскольку полетный профиль снижения и посадки, на основании которого был составлен первый этап программы испытаний, не являлся наиболее тяжелым для данного типа вертолета, его назначения и условий эксплуатации, в программу испытаний был включен второй этап, совпадающий с первым за исключением последнего подрежима – висения до поломки, – необходимого для проверки работоспособности трансмиссии при более длительном висении.

Дополнительно также были проведены специальные испытания в условиях масляного голодания (табл. 1) – испытание на режиме малых скоростей (маломощном) в течение 1 ч 40 мин и испытание на режимах повышенной мощности в течение 8 мин.

Таблица 1

Режим испытаний	Крутящий момент на ведущем зубчатом колесе, Н·м	Мощность, кВт	Длительность, мин
Малые скорости	633	331,41	120
Повышенная мощность:			
- максимально продолжительная мощность	1150	602,1	1
- торможение перед зависанием	410,6–1204	215–630,4	4
- висение	1204	630,4	2
- висение с забросами	1204–1500	630,4–785,4	1

Примечание: Частота вращения ведущего зубчатого колеса – 5000 об/мин, система смазки отключена.

Длительное испытание на режиме малых скоростей наиболее продолжительный подрежим сертификационных испытаний трансмиссии в условиях масляного голодания.

Испытание на режимах повышенной мощности представляет собой первую минуту и последние семь минут испытаний работы трансмиссии по профилю на основе летных испытаний после отключения системы смазки.

Испытания проводились в механически замкнутом стенде. Условия масляного голодания на зубчатых колесах обеспечивала установка специального защитного кожуха. Смазка подшипников зубчатых колес при этом обеспечивалась, однако за счет введения в конструкцию маслосистемы дополнительной ветки с перепускным клапаном давление масла было минимальным, что исключало образование масляного тумана.

По завершении испытаний зубчатые колеса были демонтированы с испытательного стенда и отправлены для проведения измерений на контрольно-измерительной машине.

В целях сравнения изменения конфигурации профиля измерения на контрольно-измерительной машине проводились до начала испытаний и после испытаний на кратковременном мощном режиме (табл. 2, рис. 1–3).

Таблица 2

Параметр точности*	До начала испытаний	После испытаний			
		Длительный маломощный режим	Испытания согласно требованиям АМС	Профиль по результатам летных испытаний (этап 1 программы испытаний)	Кратковременный нагруженный режим
Погрешность профиля F_a	3,55	5	8,1	25,9	27,2
Погрешность направления F_β	4,63	6,4	6,9	8,2	8,9
Накопленная погрешность шага F_p	14,5	16	18,8	59,5	48,6
Степень точности	4	4	6	9	9

Примечание: * – среднее значение по четырем измеренным зубьям.

Накопленная погрешность шага F_p показана на рис. 1, погрешность профиля F_a – на рис. 2, погрешность направления F_β – на рис. 3.

Учитывая, что продукты износа зубчатых колес попадали через картер в маслосистему, до и после каждого этапа испытаний был проведен отбор проб для определения класса чистоты и количества частиц. В табл. 3 сведены результаты анализа смывов масла, на рис. 4 – результаты анализа проб масла. Также после испытаний была проведена визуальная оценка состояния зубчатых колес.

Согласно результатам анализа масла износ поверхностей зубчатых колес на длительном маломощном режиме практически не происходит, класс чистоты пробы масла после 100 мин работы не изменился, изменение числа крупных частиц (100 мкм и выше) практически неизменно. Наихудшее качество масла имеет смыв после 8 мин работы на режимах повышенной мощности, класс чи-

стоты изменился с 12 на 15 (см. табл. 3), при этом значительно увеличивается число крупных частиц, что говорит об ускорении процесса повреждаемости рабочей поверхности зубчатых колес. Визуальная оценка проб масла также показала, что для кратковременного нагруженного профиля и в случае профиля, соответствующего летным испытаниям, наблюдается значительное потемнение масла, что свидетельствует о начале процесса коксования и увеличении температуры. Данный факт подтверждается появлением задымления на последних этапах испытаний и значениями температуры корпуса редуктора выше 100 °С.

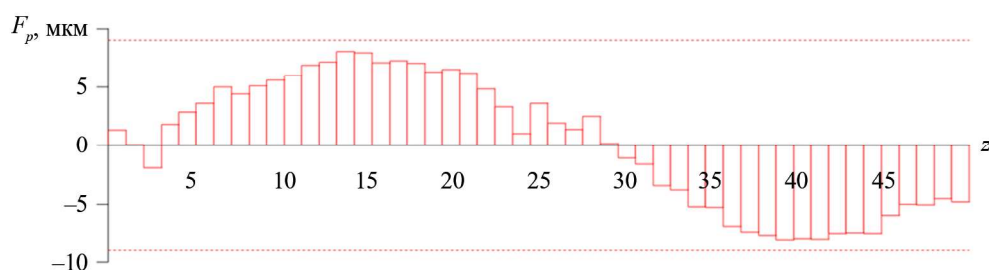


Рис. 1

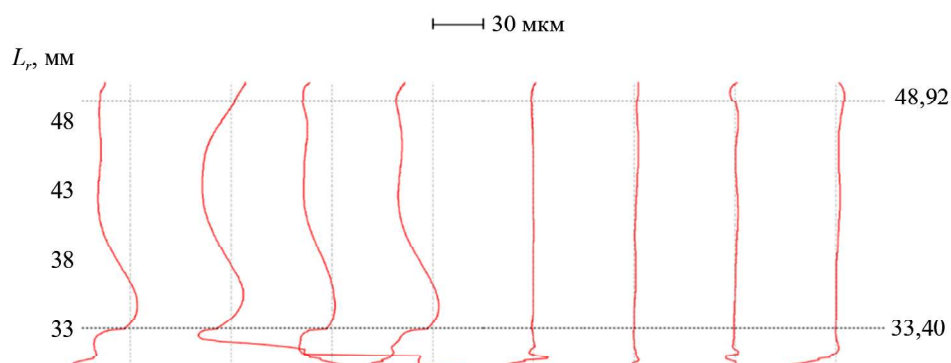


Рис. 2

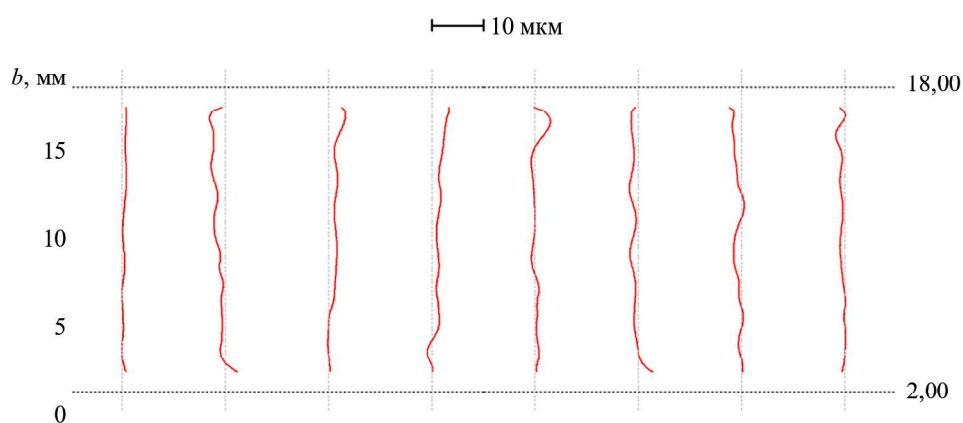


Рис. 3

Как следует из результатов замеров температур в условиях масляного голодания по профилю АМС, испытания по «реальному» полетному профилю, полученному в ходе летных испытаний, приводят к значительно большему нагреву, чем испытания по методологии EASA. Состояние поверхностей также значительно хуже при испытаниях по «реальному» профилю.

Таблица 3

Размер частиц/ испытание	До начала испытаний (проба 1)	После проведения испытаний			
		Длительный маломощный режим (проба 2)	АМС (проба 3)	Профиль по результа- там летных испыта- ний, этап 1 программы испытаний (проба 4)	Кратковременный нагруженный режим (проба 5)
5–10	48589	52846	56404	82512	51485
10–25	25303	27573	71320	29736	31735
25–50	111	142	1015	288	1029
50–100	21	42	76	81	475
100–200	3	4	4	49	200
200+	2	3	4	45	156
Итоговый класс чистоты	12	12	14	14	15

По визуальной оценке состояния поверхностей зубчатых колес после длительных испытаний на пониженной мощности и кратковременных испытаний при высоком значении крутящего момента можно сделать вывод о нелинейной скорости распространения дефекта на поверхности зубчатых колес в условиях масляного голодания. Также наблюдается несимметричность повреждений поверхности, что может объясняться как погрешностью установки, так и перекосом, вызванным неравномерным нагревом и, как следствие, различной тепловой деформацией в зоне подшипниковых опор.

Для более детального изучения процессов, происходящих в зацеплении в условиях масляного голодания, после визуальной оценки и проведения измерений на контрольно-измерительной машине были проведены лабораторные исследования образцов зубчатых колес после испытаний.

Проведенные лабораторные исследования включали испытание на микротвердость вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием по методу восстановленного отпечатка (по Виккерсу), сканирующую электронную микроскопию для исследования морфологии поверхности зуба колеса, энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию для картирования поверхности (по основным элементам) и анализа изменения элементного состава в поврежденной области, трибологические испытания по методу «шар – плоскость» (при линейном возвратно-поступательном перемещении образца относительно неподвижного контртела), измерение шероховатости поверхности профильным методом с помощью контактного профилометра.

Для проведения исследований образцы зубчатых колес были разрезаны, а также были изготовлены микрошлифы методом холодной и горячей заливки.

Измерения микротвердости проводились при нагрузке 0,098 Н на поперечном шлифе одного зуба в приповерхностном слое рабочей стороны вдоль поверхности (измерения не менее пяти раз), а также от поверхности рабочей стороны вглубь до центра с построением графиков изменения по глубине $HV = f(h)$. Результаты измерений до начала испытаний представлены на рис. 4, а, после кратковременного мощного режима – на рис. 4, б.

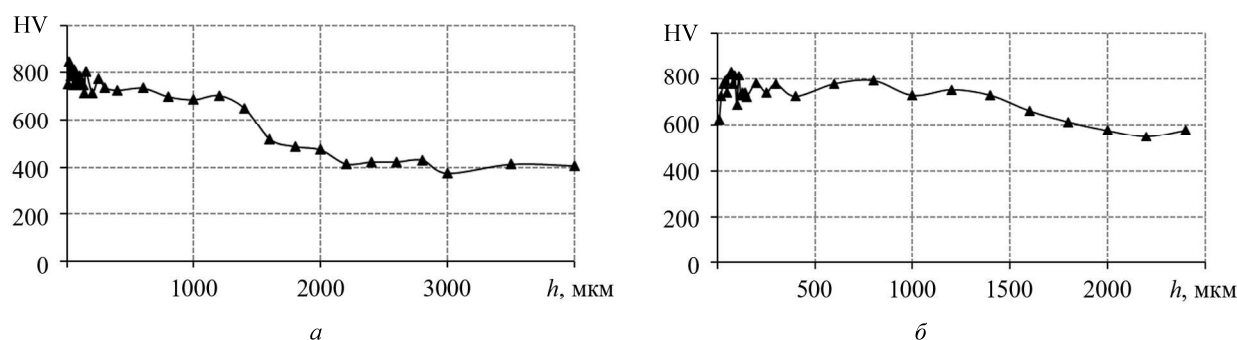


Рис. 4

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

Средняя твердость в приповерхностном слое ниже у тех профилей испытаний, в которых присутствовали тяжело нагруженные режимы. Для тяжело нагруженных режимов характерно более резкое падение твердости по глубине цементованного слоя. Несмотря на то что максимальная температура в зацеплении не превышала температуры отпуска материала, для зубчатых колес, испытанных по профилю летных испытаний и на кратковременном мощном режиме, характерно снижение твердости на 70–100 HV по всей глубине упрочненного слоя. Снижение твердости обусловлено обеднением легирующими элементами этой области. Данное снижение концентрации легирующими элементами происходит в результате повышения температуры детали (из-за отсутствия жидкого смазочного материала в зоне контакта) в процессе трения, так как полученная энергия ускоряет диффузионные процессы (легирующие элементы перемещаются в энергетически более выгодную зону).

Исследование морфологии и картирование проводилось на электронном сканирующем автоэмиссионном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU с рентгеновским энергодисперсионным детектором INCA X-MAX 50.

Продemonстрируем морфологию поверхности зуба до испытаний (рис. 5, *а*) и на кратковременном тяжело нагруженном режиме (рис. 5, *б*).

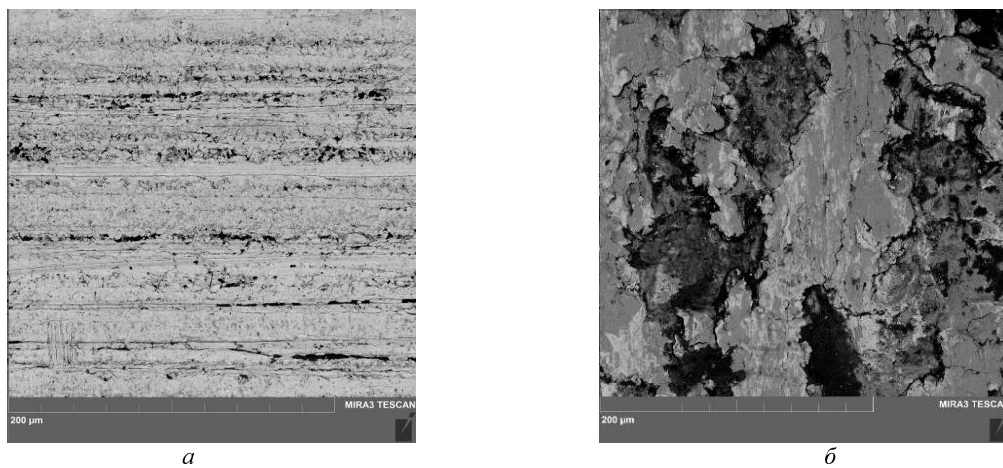


Рис. 5

Для проведения поэлементного картирования выбирались области наиболее поврежденных поверхностей: до начала испытаний (рис. 6, *а*), на длительном маломощном режиме (рис. 6, *б*), после испытаний по требованиям АМС (рис. 6, *в*), после испытаний по профилю летных испытаний (рис. 6, *г*), после испытаний на кратковременном нагруженном режиме (рис. 6, *д*).

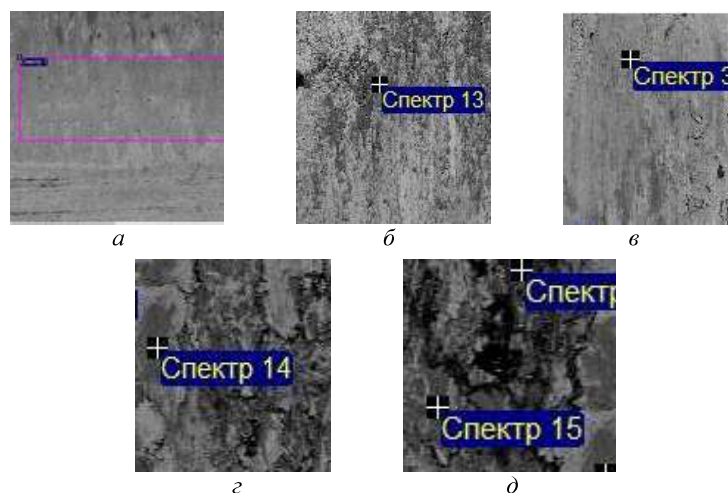


Рис. 6

Для всех зубчатых колес были выбрано несколько областей и проведено их поэлементное картирование. Результаты исследований для наиболее поврежденных областей представлены в табл. 4.

Таблица 4

Элемент	До начала испытаний	После проведения испытаний (в наиболее поврежденных областях)			
		Длительный маломощный режим	Испытания согласно требованиям АМС	Профиль по летным испытаниям	Кратковременный нагруженный режим
Углерод	5,9	5,84	5,75	3,81	4,10
Кислород	3,2	6,8	12,69	19,79	23,07
Кремний	0,1	0,13	0,12	0,29	0,52
Хром	2,7	2,14	2,63	5,64	11,18
Марганец	0,3	0,31	0,32	0,62	1,25
Железо	83,0	80,09	74,2	67,54	58,99
Никель	2,9	2,63	2,18	1	0,39
Молибден	1,9	1,51	1,52	0,79	0,2

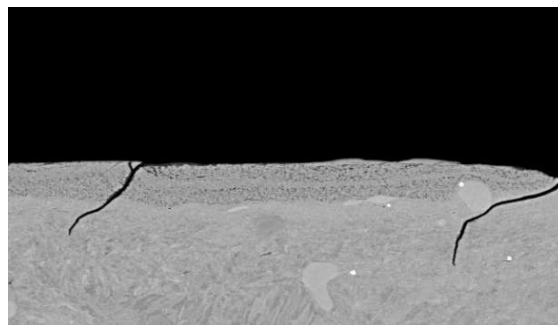
Согласно данным табл. 4 для более нагруженных режимов характерно увеличение содержания кислорода, хрома и марганца, уменьшение содержания железа, никеля и молибдена в приповерхностном слое. Увеличенное количество кислорода указывает на интенсивность протекания окислительных процессов, которые, в свою очередь, влияют на износ. Оксиды железа легко разрушаются при трении и уносятся в поверхности зубчатого колеса (содержание в зубчатом колесе железа – 83 %, в испытанном при кратковременном мощном режиме – 58,9 %). Кроме того, чрезмерный нагрев приводит также к окислению хрома, марганца и других элементов, образующих твердые фракции и повышающих абразивный износ. С другой стороны, в приповерхностном слое (по мере увеличения нагрузки и роста температуры) произошло значительное снижение молибдена и никеля – легирующих элементов, создающих в ходе цементации упрочненный диффузионный слой. При длительных испытаниях на маломощном режиме (средняя температура на зубе – 105 °С) изменение элементного состава в приповерхностном слое практически не произошло.

В рамках лабораторных исследований образцов после различных этапов испытаний было проведено микроскопическое исследование поврежденных поверхностей. На примере состояния поверхностей после длительных испытаний на малой мощности и после испытаний по профилю летных испытаний в условиях масляного голодания можно сделать вывод о характере изнашивания.

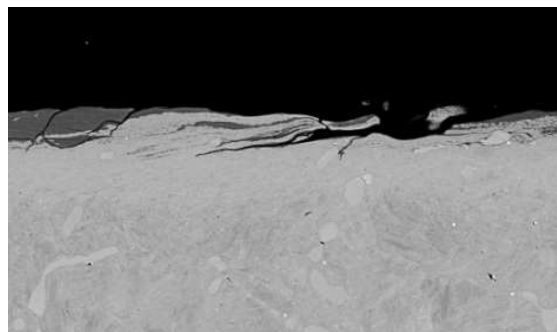
Как видим (рис. 7, а), на поверхности наблюдаются только трещины после испытаний на длительном маломощном режиме и режиме АМС, в то время как после испытаний на кратковременном мощном режиме (рис. 7, б) и по профилю, соответствующему летным испытаниям (рис. 7, в), можно заметить отслоение материала, что говорит о начале процесса перехода усталостного изнашивания в абразивное изнашивание. Данную гипотезу также подтверждают результаты трибологического исследования.

Таким образом, в результате проведенного исследования можно сделать вывод о большей повреждаемости зубчатых колес в условиях масляного голодания при эксплуатации на кратковременных высоконагруженных режимах по сравнению с длительными низконагруженными режимами. Данное явление объясняется наиболее интенсивным нагревом рабочей поверхности. Кроме того, нагрев на высоконагруженных режимах имеет нелинейный характер, типичный для потери теплового равновесия в системе.

Благодаря лабораторным исследованиям можно выделить ряд значимых явлений, вызывающих ускоренное повреждение зубчатых колес в условиях масляного голодания, – изменение структуры упрочненной поверхности зубчатых колес, преобладание твердых окислов на поверхности, переход от усталостного износа к абразивному, изменение твердости рабочих поверхностей зубчатых колес вследствие отпуска материала.



а



б



в

Рис. 7

Благодаря оценке состояния зубчатых колес после проведенных испытаний определен наиболее тяжелый по последствиям профиль завершения полета и посадки, который необходимо использовать в дальнейшем при сертификационных испытаниях агрегатов трансмиссии вертолета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селихов А.Ф. Основные принципы обеспечения прочности и ресурса вертолетов в СССР // Прочность авиационных конструкций: Тр. ЦАГИ. Вып. № 2631. С. 7–20.
2. Суслин А.В., Пилла К.К. Исследование динамической нагруженности авиационных конических зубчатых передач // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 3. С. 108–114.
3. Колесников И.В., Коронец П.А., Синютин Е.С. Вибродиагностика зубчатых муфт трансмиссии вертолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 1. С. 9–14.
4. Неделько Д.В. Способ определения предельно допустимых значений диагностических признаков технического состояния агрегатов трансмиссии вертолета // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 3. С. 3–7.
5. Яновский Л.С., Ежов В.М., Синютин Е.С. Исследование кинетики изменения эксплуатационных свойств масел для авиационных газотурбинных двигателей // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 4–10.
6. Нормы летной годности тяжелых винтокрылых летательных аппаратов. НЛГ 29. [Electronical Resource]. URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/1/4/3/8/4/143846ab7c12623880831ef761d1a25b.pdf?ysclid=lqe52rzg5k992354158> (дата обращения: 25.11.2023).
7. CS-29 Amendment 11. Regular Update of the Certification Specifications for Large Rotorcraft (CS-29) [Electronical Resource]. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/cs-29-amendment-11> (дата обращения: 25.11.2023).

8. AC 29-2C. Certification of Transport Category Rotorcraft (Changes 1–9 Incorporated) [Electronical Resource].
URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/74404 (дата обращения: 25.11.2023).

Поступила в редакцию 25.12.23

После доработки 29.12.23

Принята к публикации 30.12.23

The Influence of Duration and Loading Modes on Condition of the Helicopter Transmission Gears while Operating under Condition of Oil Starvation

L.A. TIMOKHINA¹, V.G. ANAN'EVA², S.G. GUKASYAN²,
AND D.V. NEDEL'KO³

¹ FAE "Aviation Register of Russian Federation" FATA (Rosaviatsiya), Moscow

² P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors (CIAM), Moscow

³ Zhukovsky Central Aerohydrodynamics Institute (TsAGI), Zhukovsky

An experimental research of the effect of loading mode durations and load modes on the condition of helicopter transmission gears when operating under oil starvation conditions is carried out. The results of laboratory studies of gears condition before and after tests under oil starvation are considered when simulating various profiles of an emergency landing of a helicopter after triggering the "Pressure loss" alarm in the lubrication system. The influence of loading modes and durations of loading on the gear wear pattern during testing under the oil starvation conditions is determined. Recommendations are proposed for conducting certification tests to simulate a failure of lubrication system on the helicopter gearbox.

Helicopter gearbox, gear wheels, oil starvation, wear, operation reliability, certification