

УДК 669.017:621.785

Л.А. ХАСАНОВА

ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ АЗОТИРУЕМЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ГТД

Установлена взаимосвязь показателей качества упрочненного слоя с эксплуатационными свойствами азотированных зубчатых колес, используя статистические методы оценки. Получены соответствующие статистические модели, которые позволяют оценить предел контактной выносливости и износостойкость в зависимости от твердости и толщины азотированного слоя. Для комплексной оценки качества и работоспособности азотированного слоя на зубчатом колесе с учетом твердости азотированной поверхности, твердости сердцевины и относительной толщины слоя предлагается использовать критерий качества (работоспособности) слоя, что позволит обоснованно выбрать определенное сочетание показателей качества слоя для получения требуемых эксплуатационных свойств азотированного слоя.

Ключевые слова: азотирование, зубчатые колеса, эксплуатационные свойства, контактная выносливость, износостойкость, статистический анализ, показатели качества слоя.

Введение

Накопленный опыт эксплуатации и испытаний серийных, опытных и проектируемых ГТД показывает, что к структурным составляющим, в значительной степени определяющим их безотказность и ресурс, относятся зубчатые передачи, силовая и кинематическая нагруженность которых обычно в 2–4 раза превышает принятые в общем машиностроении [1]. В конструктивном и технологическом отношении зубчатые колеса являются одними из наиболее сложных деталей двигателя [2], но, тем не менее, до настоящего времени методы оценки, прогнозирования и достижения заданных эксплуатационных характеристик зубчатых колес практически не разработаны [3]. Таким образом, в авиадвигателестроении решение вопросов, связанных с разработкой методов, средств оценки и обеспечения требуемых эксплуатационных параметров зубчатых колес является одним из перспективных направлений.

Анализ литературных и производственных данных [1 – 3, 6, 7] показывает, что необходимый комплекс эксплуатационных свойств азотируемых деталей обеспечивается за счет оптимального сочетания толщины и твердости азотируемого слоя. Эти характеристики являются основными показателями качества азотированного слоя, которые в значительной степени и определяют эксплуатационные характеристики азотируемых зубчатых колес.

Согласно ГОСТ 21354-87 [6] для азотированных зубчатых колес предел контактной выносливости можно оценить по соотношению: $\sigma_{Hlim} = 17HRC + 200$ ($\sigma_{Hlim} = 1050$ МПа). Однако во многих случаях

указанная зависимость не подтверждается, то есть не обеспечивается стабильное качество зубчатых колес.

В работах [8, 9] предлагается для более точной оценки и прогноза эксплуатационных характеристик поверхностного слоя зубчатых колес после ХТО учитывать влияние абсолютной h и относительной h/t толщины слоя, твердость поверхности HV_{Π} и сердцевины HV_c зуба.

Сложный и многофакторный характер взаимосвязи между эксплуатационными характеристиками и показателями качества упрочняемого слоя в данном случае делает практически невозможным использование аналитических методов, поэтому для решения данной задачи использовали метод статистического анализа, который успешно применяется для решения многих трудно-формализуемых задач.

Основная цель данной работы заключается в построении статистических моделей для оценки предела контактной выносливости и износостойкости азотируемых образцов в зависимости от показателей качества азотируемого слоя.

1. Экспериментальная часть

1.1. Исследование влияния толщины и твердости азотированного слоя на предел выносливости

В качестве исходных данных для статистического анализа использовали собственные производственные данные ОАО «НПО «Сатурн» и экспериментальные данные работ [1, 11, 12]. Для оценки влияния концентраторов напряжений исследования

выполняли на гладких и надрезанных образцах диаметром 7,5 мм надрез v-образной формы с углом 60° и глубиной 0,3 мм согласно ГОСТ 25.502–79. Азотирование образцов в зависимости от марки стали

производили при температуре $t = (520 - 540) ^\circ\text{C}$ в течение 48 – 60 ч.

Исходные данные для статистического анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные для статистического анализа влияния толщины h и твердости HV на предел выносливости σ_{Hlim} азотированного слоя

18X2H4BA				38XHMΦA				20XH3MΦA			
h, мм	σ_{Hlim} , $\sigma_{\text{Hlimк}}$, МПа	HV _п	σ_{Hlim} , $\sigma_{\text{Hlimк}}$, МПа	h, мм	σ_{Hlim} , $\sigma_{\text{Hlimк}}$, МПа	HV _п	σ_{Hlim} , $\sigma_{\text{Hlimк}}$, МПа	h, мм	σ_{Hlim} , $\sigma_{\text{Hlimк}}$, МПа	HV _п	σ_{Hlim} , $\sigma_{\text{Hlimк}}$, МПа
0,08	570/300	550	570/280	0,06	580/280	600	580/380	0,04	600/480	550	570/430
0,12	600/340	560	580/300	0,08	590/320	620	590/320	0,10	660/570	560	580/450
0,16	620/400	580	590/300	0,10	610/380	650	600/400	0,20	700/580	580	590/480
0,20	680/470	600	600/320	0,12	630/420	670	620/410	0,30	700/585	600	600/500
0,24	680/480	610	620/380	0,20	680/480	670	630/450	0,35	690/580	610	620/520
0,28	675/500	620	640/400	0,32	680/480	700	650/470	0,40	688/576	620	640/530
0,30	676/500	630	650/510	0,36	680/478	720	665/474	0,45	686/575	650	670/550
0,38	680/510	648	665/420	0,38	679/480	723	668/476	0,50	687/576	680	680/560
0,40	680/510	650	670/500	0,40	678/480	725	670/476	0,60	688/575	700	700/570
0,45	660/510	660	676/470	0,44	670/476	740	680/480				
0,50	665/500	680	680/450	0,48	668/476	748	690/500				
0,60	660/500	700	700/500	0,50	668/476	750	700/520				
				0,52	665/474	755	705/525				
				0,58	665/476	760	710/540				
				0,60	650/475	780	720/550				

Примечание: через косую черту указаны предел выносливости гладких и надрезанных образцов

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, показывает, что азотирование во всех случаях приводит к повышению предела выносливости, как на гладких, так и на надрезанных образцах. Однако следует отметить, что влияние надреза на уменьшение предела выносливости на сталях различно. Показателя чувствительности к надрезу K_H для стали 18X2H4BA составляет $K_H = 0,3 \pm 0,07$, для стали 38XHMΦA – $K_H = 0,279 \pm 0,05$ и для стали 20XH3MΦA – $K_H = 0,185 \pm 0,02$. Меньшее значение K_H в последнем случае свидетельствует о меньшей чувствительности к надрезу стали 20XH3MΦA.

В результате статистического одномерного корреляционного анализа по программе STATISTICA 6.0 были получены зависимости предела выносливости гладких (σ_{Hlim}) и надрезанных ($\sigma_{\text{Hlimк}}$) образцов из исследуемых сталей от толщины и твердости азотированного слоя.

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Hlim}} &= 411,2 + 1882,0h - 4669,0h^2 + 3566,0h^3; \\ \sigma_{\text{Hlimк}} &= 100,0 + 2836,0h - 6316,0h^2 + 4498,0h^3; \\ \sigma_{\text{Hlim}} &= 59,85 + 0,924\text{HV}_{\text{п}}; \\ \sigma_{\text{Hlimк}} &= 608,3 - 1,619\text{HV}_{\text{п}} \text{ для стали 18X2H4BA}; \\ \sigma_{\text{Hlim}} &= 500,9 + 1459,0h - 3632,0h^2 + 2728,0h^3; \\ \sigma_{\text{Hlimк}} &= 139,7 + 3019,0h - 8090,0h^2 + 6703,0h^3; \\ \sigma_{\text{Hlim}} &= 71,44 + 0,829\text{HV}_{\text{п}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Hlimк}} &= 328,4 - 1,121\text{HV}_{\text{п}} \text{ для стали 38XHM}\Phi\text{A}; \\ \sigma_{\text{Hlim}} &= 556,6 + 1325,0h - 3769,0h^2 + 3221,0h^3; \\ \sigma_{\text{Hlimк}} &= 444,3 + 1379,0h - 4008,0h^2 + 3478,0h^3; \\ \sigma_{\text{Hlim}} &= 73,54 + 0,898\text{HV}_{\text{п}}; \\ \sigma_{\text{Hlimк}} &= 51,91 - 0,911\text{HV}_{\text{п}} \text{ для стали 20XH3M}\Phi\text{A}. \end{aligned}$$

Исследование влияния толщины и твердости поверхности азотированного слоя на предел выносливости показывает, что

– твердость поверхности оказывает линейное, прямопропорциональное влияние на предел выносливости образцов всех исследуемых сталей рис. 1, а, б, в. Следует отметить, что исследуемые значения твердости находились в рекомендуемых по ГОСТ 21354–87 пределах, при которых допустимое контактное напряжение при максимальной нагрузке не вызывает остаточной деформации или хрупкого разрушения поверхностного слоя;

– толщина азотированного слоя оказывает сложное влияние на предел выносливости. С ростом толщины слоя от 0,08 до 0,28 предел выносливости возрастает до определенного максимального значения на всех исследуемых сталях, затем не изменяется или незначительно снижается с дальнейшим увеличением толщины слоя.

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 1 позволяет определить величину толщины и твердости азотированного слоя для дости-

жения максимально возможного или необходимого значения предела выносливости.

Так как эксплуатационный уровень предела выносливости формируется под взаимным влиянием

показателей качества азотированного слоя. Поэтому построенные однофакторные модели – парные уравнения регрессии – обычно оказываются недостаточными.

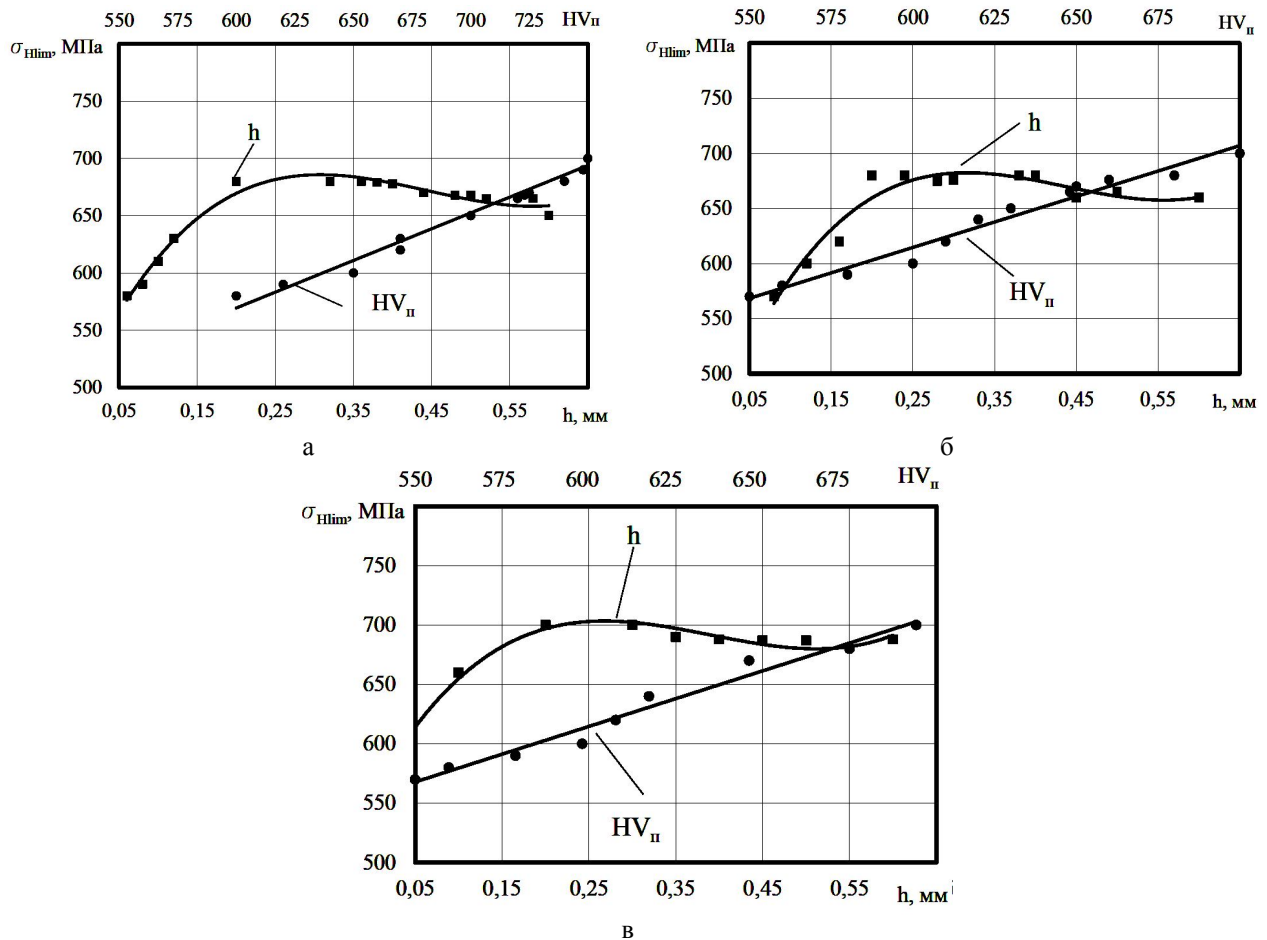


Рис. 1. Зависимость предела выносливости гладких образцов σ_{Hlim} от толщины h и твердости HV_{II} азотированного слоя

В связи с этим с помощью программы STATISTICA 6.0 была построена двухфакторная модель – уравнение линейной двухфакторной регрессии σ_{Hlim} , МПа = $f(HV_{II}, h)$ для сталей 38ХНМФА и 20ХНЗМФА (1) и (2):

$$\sigma_{Hlim}, \text{ МПа} = 206,73 + 0,344 \cdot h + 0,434 \cdot HV_{II} + 0,898 \cdot h \cdot HV_{II}, R^2 = 0,9898 \text{ (сталь 38ХНМФА);}$$

$$\sigma_{Hlim}, \text{ МПа} = 438,7 + 0,182 \cdot h + 0,214 \cdot HV_{II} + 0,3 \cdot h \cdot HV_{II}, R^2 = 0,9812 \text{ (сталь 20ХНЗМФА),}$$

где h – толщины азотированного слоя, мм; HV_{II} – твердость азотированного слоя.

Адекватность двухфакторной модели оценивали критерием Фишера F . Из уравнений регрессии (1) и (2) предел выносливости определяется в большей степени совместным влиянием показателей качества азотированного слоя, чем по отдельности.

Анализ производственных данных ОАО «НПО

«Сатурн» показывает, что использование в качестве показателей твердость и толщину азотированного слоя не обеспечивает стабильного качества зубчатых колес.

Для комплексной оценки качества и работоспособности азотированного слоя на зубчатом колесе с учетом твердости слоя (HV_{II}) и сердцевины (HV_c) и относительной толщины (h/r) слоя предлагается использовать критерий качества (работоспособности) слоя (3):

$$K_p = \frac{HV_{II} - HV_c}{HV_c} \cdot \frac{h}{r}. \quad (3)$$

Такой подход позволит в количественной форме оценить свойства материала изделия в том объеме, который в данных условиях испытания или работы нагружен наиболее интенсивно. В какой-то мере это оценка соответствия поля сопротивления материала детали полю нагружения.

Регрессионные зависимости предела выносливости от критерия работоспособности:

$$38\text{XHM}\Phi\text{A}: \sigma_{\text{Hlim}} = 812,72 + 60,623 \cdot \ln(K_p); \quad (4)$$

$$20\text{XHM}\Phi\text{A} \sigma_{\text{Hlim}} = 826,08 + 54,886 \cdot \ln(K_p). \quad (5)$$

1.2. Исследование влияния толщины и твердости азотированного слоя на износостойкость

Долговечность зубчатых колес во многом определяется состоянием их поверхности и в первую очередь её износостойкостью.

В настоящее время не установлено определенного влияния показателей качества азотированного слоя на износостойкость деталей. В связи с этим исследовали одну из самых распространенных характеристик качества и работоспособности азотированного слоя – износостойкость в зависимости от толщины и твердости упрочненного слоя.

Для статистической оценки величины износостойкости сталей от толщины и твердости азотированного слоя использовали производственные и экспериментальные данные работ [1, 13]. Исходные данные для статистического анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для статистического анализа влияния толщины и твердости азотированного слоя на интенсивность изнашивания

Скорость изнашивания от толщины слоя		Скорость изнашивания от твердости слоя	
Сталь 18X2H4BA			
h, мм	$I_h \cdot 10^6$ мкм/мин	HV _n	$I_{\text{HVn}} \cdot 10^6$ мкм/мин
0,015	145	400	42
0,030	104	470	50
0,067	67	500	45
0,080	63	560	52
0,090	58	570	52
0,100	54	600	36
0,110	42	670	34
0,200	32	700	30
0,250	28	720	25
0,500	20	750	20

Результаты этого анализа, полученные по программе STATISTICA 6.0 однофакторные корреляционные зависимости от толщины (h) и твердости (HV) азотированного слоя:

$$V_h \cdot 10^6 = 13,04 \cdot h^{-0,58}, \quad (6)$$

$$V_{\text{HV}} \cdot 10^6 = 47,74 + 0,085 \cdot \text{HV}_n - 0,00018 \cdot \text{HV}_n^2 \quad (7)$$

Заключение

Практическая значимость статистической оценки влияния показателей качества азотированного слоя заключается в возможности использования полученных статистических зависимостей для прогнозирования эксплуатационных свойств азотированных деталей.

Предложенный критерий качества (работоспособности) K_p позволит конструктору обоснованно и целенаправленно, не снижая требований по прочности и долговечности, изменять значения показателей упрочнения деталей: снижать или повышать твердость и толщину азотированного слоя, что позволит создать надежную основу для стабилизации эксплуатационных свойств зубчатых колес на требуемом высоком уровне.

Литература

1. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лактин, Я.Д. Коган, Г.-И. Шпис, З. Бомер. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.
2. Чаттерджи-Фишер Р. Азотирование и карбонитрирование: пер. с нем. / Р. Чаттерджи-Фишер, Ф.В. Эйзелл, Р.И Хоффман. – М.: Металлургия, 1990. – 279 с.
3. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 400 с.
4. Тескер Е.И. Контактная прочность цементованных и нитроцементованных зубчатых колес / Е.И. Тескер // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1988. – № 2. – С. 6-12.
5. Влияние силовых и геометрических параметров теоретически точного контакта поверхности упрочненных зубчатых передач на выбор характеристик упрочненного слоя / В.Н. Короткин, Ю.Д. Харитонов, Н.П. Онишков, И.А. Нахимович // *Упрочняющие технологии и покрытия* – 2008. – № 8. – С. 42-49.
6. ГОСТ 21354–87. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 125 с.
7. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В.М. Зинченко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.
8. Структурные параметры и критерии оценки прочности и долговечности / В.А. Оловянников, В.М. Зинченко, Б.В. Георгиевская, В.В. Кузнецов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1989. – № 8. – С. 42-45.
9. Боголюбова И.В. Исследование механизма разрушения образцов из стали 12Х2Н4А в зависимо-

сти от режимов химико-термической и термической обработки / И.В. Боголюбова, Б.В. Георгиевская, В.М. Зинченко // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1988. – № 6. – С. 2-4.

10. Жуков А.А. Статистический анализ влияния химического состава сталей на показатели качества азотированного слоя / А.А. Жуков, Л.А. Щапова // *Упрочняющие технологии и покрытия.* – 2007. – № 3. – С. 48-52.

11. Солодкин Г.А. Прогнозирование предела выносливости сталей, упрочненных химико-термической обработкой / Г.А. Солодкин, Г.М. Волков, Л.Я. Ратгауз // *Металловедение и термическая*

обработка металлов. – 1989. – № 8. – С. 37-41.

12. Технология производства авиационных двигателей: Монография / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, В.Ф. Мозговой, Е.Я. Корневский. – Запорожье: Изд-во комплекс ОАО «Мотор Сич», 2000. – Т. 1. – 945 с.

13. Суслов А.Г. Направления работ брянской технологической школы по решению проблемы «Обеспечения и повышения качества изделий машиностроения и технологической оснастки» / А.Г. Суслов // *Справочник. Инженерный журнал. Приложение.* – 2004. – № 11. – С. 2-5.

Поступила в редакцию 31.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, ведущий специалист В.М. Самойленко, Лыткаринский машиностроительный завод (ЛМЗ), Лыткарино, Россия.

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АЗОТУЄМИХ ЗУБЧАТИХ КОЛІС ГТД

Л.О. Хасанова

Встановлений взаємозв'язок показників якості зміцненого шару з експлуатаційними властивостями азотованих зубчатих коліс, використовуючи статистичні методи оцінки. Отримані відповідні статистичні моделі, які дозволяють оцінити межу контактної витривалості і зносостійкість залежно від твердості і товщини азотованого шару. Для комплексної оцінки якості і працездатності азотованого шару на зубчатому колесі з урахуванням твердості азотованої поверхні, твердості серцевини і відносної товщини шару пропонується використовувати критерій якості (працездатності) шаруючи, що дозволить обґрунтовано вибирати певне поєднання показників якості шаруючи для набуття необхідних експлуатаційних властивостей азотованого шару.

Ключові слова: азотування, зубчаті колеса, експлуатаційні властивості, контактна витривалість, зносостійкість, статистичний аналіз, показники якості шаруючи.

IMPROVED SERVICE PROPERTIES OF GAS-TURBINE ENGINE NITRATED GEAR WHEELS

L.A. Khasanova

On the basis of the statistical analysis the correlation to parameters of hardened layer quality with service properties of nitrated gear wheels are received that will allow most is proved to choose the certain combination of parameters of quality of a layer for reception of demanded service properties of the nitrated layer.

Key words: nitriding, gear wheels, service properties, endurance limit, wear resistance, the statistical analysis, parameters of layer quality.

Хасанова Лейла Александровна – канд. техн. наук, ведущий инженер Управления главного металлурга ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия, e-mail: leyla.khasanova@yandex.ru.