

УДК 669.017:621.785

А.А. ЖУКОВ<sup>1</sup>, Л.А. ХАСАНОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ГОУ ВПО Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия

<sup>2</sup>ОАО «НПО «Сатурн», Рыбинск, Россия

## АНАЛИЗ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ АЗОТИРОВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ГТД

*Выявлена взаимосвязь марки стали с показателями качества азотированного слоя. Получены регрессионные статистические модели для оценки и прогноза качества азотированного слоя в зависимости от химического состава стали. Разработана математическая модель и алгоритм расчета показателей качества азотированного слоя от технологических факторов и химического состава стали, обеспечивающая возможность компьютерного управления качеством упрочненного слоя, а также оптимизации технологических режимов азотирования. Предложены рекомендации по совершенствованию технологического процесса азотирования зубчатых колес для ГТД за счет использования методов статистического анализа и моделирования.*

**Ключевые слова:** азотирование, математическое моделирование, статистический анализ, зубчатые колеса, показатели качества слоя.

### Введение

В большинстве случаев разрушение зубчатых колес, как и других многочисленных деталей машин, начинается на поверхности и в поверхностных слоях. Разброс долговечности однотипных зубчатых колес, изготовленных и упрочненных в одинаковых условиях производства, достигает 10 и более раз. Это указывает на существенное влияние технологических факторов на характеристики азотированного слоя и на отсутствие надежных и адекватных математических моделей для прогноза и обеспечения заданных параметров слоя в зависимости от технологических факторов и марки (химического состава) стали.

Возможности технологического процесса азотирования обусловлены тем, что многообразие формирующихся структурных и фазовых особенностей азотированных слоев, особенно в легированных сталях, не полностью использованы. В этой связи большое значение приобретает совершенствование технологии азотирования, с целью формирования заданной структуры и свойств азотированного слоя, обеспечивающих необходимые характеристики изделий. Это возможно на основе использования обобщенной математической модели процесса азотирования адекватно отражающей реальный процесс.

Цель данного исследования – разработка и внедрение мероприятий по совершенствованию технологического процесса азотирования зубчатых колес

ГТД на основе методов статистического анализа и моделирования.

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- определены степень и характер влияния легирующих элементов на показатели азотированного слоя методом корреляционно – регрессионного анализа с использованием программы STATISTICA 6.0;
- на основании имеющихся в литературе аналитических зависимостей, описывающих общие закономерности процесса азотирования и кинетики формирования фаз, разработана математическая модель для прогнозирования, основных характеристик азотированного слоя в зависимости от технологических факторов: температуры, длительности процесса, состава газовой атмосферы.

### 1. Экспериментальная часть

#### 1.1. Исследование влияния легирующих элементов на толщину и твердость азотированного слоя

Степень и характер влияния легирующих элементов на показатели азотированного слоя определяли методом корреляционно – регрессионного анализа с использованием программы STATISTICA 6.0. Исследовали 16 марок сталей, наиболее широко применяемых для азотирования в авиадвигателестроении. Во всех исследуемых сталях было принято постоянное содержание S и P не более 0,03%, а Si и Mn от 0,25 до 0,45% масс. В результате статистического анализа получены многофакторные регрес-

сионные уравнения для прогноза толщины и твердости азотированного слоя в зависимости от химического состава стали [1].

Первоначально, по химическому составу 11 марок сталей системы Fe – C – ЛЭ были рассчитаны коэффициенты корреляции между содержанием легирующего элемента, толщиной и твердостью слоя. При этом, все легирующие элементы по характеру влияния на свойства азотированного слоя можно разбить на две группы: 1) W, Ni, Mn, Si, Cr монотонно повышают твердость слоя и снижают толщину слоя с увеличением их содержания в стали; 2) Al, V, Ti повышают твердость слоя, толщина слоя возрастает до определенной концентрации элементов (~ 2,0%), а затем толщина слоя снижается. Это, по-видимому, является оптимальным содержанием легирующих элементов в стали.

Для статистического анализа суммарного влияния легирующих элементов изучали 16 марок сталей. Номенклатура исследуемых сталей подобрана с учетом следующих особенностей:

1. Широкого диапазона изменения содержания углерода–С от 0,15 до 0,87%.
2. Mn от 0,15 до 0,8%.
3. Si от 0,17 до 0,40%.
4. Наличие сложолегируемых комплексов, содержащих основные нитридообразующие элементы: Cr–Ni–Mo–Ti–V; Cr–Ni–Mo–W–V.

На основании статистического анализа с использованием программы STATISTICA 6.0 были получены многофакторные регрессионные уравнения линейного и нелинейного типа зависимости толщины (h) и твердости (HV) азотированного слоя от суммарного влияния легирующих элементов. Так как множественные коэффициенты корреляции для нелинейных уравнений более высокие, поэтому их можно рекомендовать для практического использования:

$$h = 0,86 - 5,50 \cdot (\%C) + 3,44 \cdot (\%C)^2 + 0,880 \cdot (\%V) - 7 \cdot (\%V)^2 - 0,019 \cdot (\%Al) + 0,0007 \cdot (\%Al)^2 + 0,15 \cdot (\%Ti) - 0,034 \cdot (\%Cr) + 0,014 \cdot (\%Cr)^2 - 0,021 \cdot (\%W) + 0,011 \cdot (\%W)^2 - 0,01 \cdot (\%Ni) + 0,0006 \cdot (\%Ni)^2, \text{ мм; } (\varepsilon = 3\%);$$

$$HV = 550,7 + 79,7 \cdot (\%C) - 11,9 \cdot (\%C)^2 + 95,12 \cdot (\%V) - 31,56 \cdot (\%V)^2 + 120 \cdot (\%Al) - 20,3 \cdot (\%Al)^2 + 170,07 \cdot (\%Ti) - 209,0 \cdot (\%Mo) + 114,4 \cdot (\%Mo)^2 + 226,2 \cdot (\%Cr) - 39,9 \cdot (\%Cr)^2 + 80,3 \cdot (\%W) - 29,5 \cdot (\%W)^2; (\varepsilon = 4\%).$$

## 1.2. Исследование влияния технологических режимов на параметры качества азотированного слоя

Для исследования влияния технологических режимов на параметры азотированного слоя на основании физико-химических и статистических закономерностей была составлена математическая модель, позволяющая прогнозировать основные характеристики азотированного слоя (толщину, твердость слоя, распределение твердости и концентрации азота по толщине азотированного слоя) в зависимости от технологических факторов (температуры, времени, состава газовой атмосферы и давления).

На начальной стадии разработки модели аналитические уравнения были систематизированы и сгруппированы в соответствующие блоки согласно общей принципиальной схеме процесса азотирования. На основе составленной математической модели был разработан алгоритм и программа «NITROTOMOS» (азотированный слой). Программа состоит из 4 подпрограмм, каждая из которых проводит расчеты определенного показателя качества азотированного слоя. Программа зарегистрирована в Отраслевом фонде алгоритмов и программ Министерства образования РФ., № Госрегистрации – 50200700471 [2].

## 2. Анализ полученных результатов

### 2.1. Оптимизация технологических режимов азотирования зубчатых колес

В конструкторской документации на азотируемое изделие основные требования предъявляются к толщине и твердости упрочненного слоя. Так как, получаемая при азотировании твердость поверхности, а также глубина азотированного слоя являются критериями оценки эксплуатационной пригодности азотированных деталей [3, 4].

Таким образом, в производственных условиях технологу важно корректно назначать режимы технологического процесса азотирования, что вызвано необходимостью получения заложенных в чертеже свойств детали.

Несовершенство расчетов проводимых в настоящее время на многих производствах приводит к тому, что продолжительность выдержки назначается в довольно широких пределах, во многих случаях с большим избытком, что в свою очередь вызывает излишние затраты времени, приводит к значительным колебаниям в толщине слоя, что вызывает также понижение качества изделий.

Анализ производственных данных по азотированию зубчатых колес из стали 18X2H4MA на ОАО «НПО «Сатурн» позволил выявить следующие не-

достатки технологического процесса:

1. Не обеспечивается требуемая толщина азотированного слоя, которая согласно нормативно-технологической документации (НТД) должна находиться в пределах от 0,2 до 0,4 мм.

2. Недостаточная стабильность качества азотированного слоя по твердости, согласно НТД твердость  $HV \geq 650 HV$ .

3. Наблюдаются случаи снижения твердости сердцевин зуба в процессе азотирования зубчатого колеса после предварительной термической обработки, когда твердость сердцевин составляет 311...326 НВ.

Основными причинами указанных недостатков является чувствительность стали 18X2H4MA к структурным и фазовым превращениям в условиях повышенных температур, поэтому при разработке технологического процесса азотирования необходимо назначать более жесткие (оптимальные) температурно-временные режимы.

С целью оптимизации технологического процесса азотирования зубчатого колеса с помощью разработанной программы «NITROTOMOS», проведен расчет технологических режимов азотирования и их сравнение с известными оптимальными режимами.

Расчеты проводились в пределах стандартных режимов в целях их оптимизации. В качестве необходимого базового значения в программу вводилось среднее значение толщины азотированного слоя равное 0,3 мм при норме по техническим условиям чертежа (0,2 – 0,4) мм и минимальное значение твердости – 650 HV при норме  $\geq 650 HV$ . Для проверки адекватности расчетов максимально допустимое значение погрешности принимали равным 10%. Массовую долю легирующего элемента стали, задавали из результатов спектрального анализа (возможно также задание среднего значения химического состава стали из справочных данных). Твердость основы принимали равной – 356 HV, как среднее значение по техническим условиям (311 – 388) НВ при переводе (312 – 401) HV.

Результаты расчета толщины азотированного слоя при различных значениях температуры азотирования  $T_{аз}$ , °C и времени выдержки  $\tau_{выд}$ , ч для зубчатого колеса из стали 18X2H4MA приведены в таблице 1.

Из приведенных расчетов (табл. 1) видно, что при температуре азотирования 490 °C и времени выдержки от 25 до 30 часов азотированный слой получается необходимой толщины, установленной техническими условиями чертежа.

При температуре азотирования 490 °C начиная с времени выдержки от 33 до 35 часов толщина азотированного слоя шестерни не соответствует техни-

ческим условиям, а при температуре 500 °C и 510 °C несоответствие наблюдается уже с выдержки в 30 часов.

Таблица 1

Расчетные данные по толщине азотированного слоя  $h$ , мм

$T_{аз}$ , °C	Толщина азотированного слоя при различной продолжительности выдержки, $\tau_{выд}$ , ч				
	25	28	30	33	35
490	0,2984	0,3393	0,4038	0,4149	0,4438
500	0,3108	0,3503	0,4211	0,4271	0,4525
510	0,3295	0,3575	0,4238	0,4288	0,4600

Результаты расчета твердости азотированной поверхности при различных значениях температуры  $T_{аз}$ , °C и времени выдержки  $\tau_{выд}$ , ч приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения твердости HV

$T_{аз}$ , °C	Толщина азотированного слоя в зависимости от продолжительности выдержки, $\tau_{выд}$ , ч				
	25	28	30	33	35
490	957,8	960,7	967,8	968,8	968,3
500	958,1	960,0	966,8	965,6	964,8
510	951,5	958,1	965,3	963,2	960,7

Из табл. 2 следует, что значения твердости азотированной поверхности шестерни из стали 18X2H4MA при различных режимах азотирования соответствуют твердости, установленной техническими условиями чертежа.

Из анализа проведенных расчетов следует, что продолжительность выдержки при температуре азотирования  $500 \pm 10$  °C шестерен из стали 18X2H4MA должна назначаться в пределах 25...30 часов, взамен предусмотренного предела варьирования по стандартной технологии 25...35 часов.

Процесс азотирования шестерни при рекомендованной продолжительности выдержки и по существующей технологии показал достоверность данных выводов. Толщина слоя на зубе шестерни при выдержке 28 ч при температуре  $500 \pm 10$  °C составила 0,32 мм; а при выдержке 34 ч при температуре  $500 \pm 10$  °C – 0,44 мм.

Проведена оптимизация режимов серийной технологии азотирования шестерни, с целью получения требуемых толщины и твердости азотированного слоя. В результате оптимизации сокращен диапазон продолжительности изотермической выдержки, что позволяет сократить продолжительность азотирования и получить заданные свойства слоя.

Толщину азотированного слоя экспериментально определяли металлографическим методом на

оптических микроскопах Nikon Epihot 200 и сканирующем электронном микроскопе JOEL JSM 6400LV. Замер микротвердости по толщине азотированного слоя на приборе MicroMet 5114.

Экспериментальные и расчетные результаты распределения микротвердости по толщине азотированного слоя представлены в графическом виде на рис. 1.

HV<sub>0.05</sub>

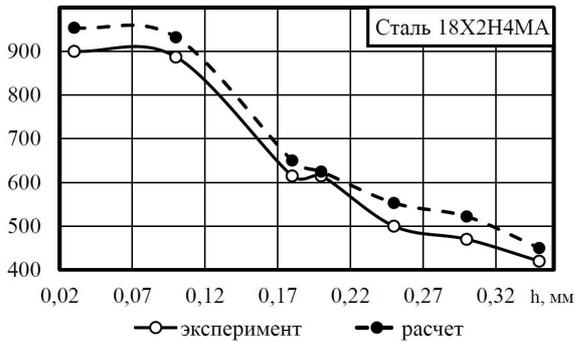


Рис. 1. Сравнение расчетных и экспериментальных данных распределения микротвердости по толщине азотированного слоя

Экспериментально профиль концентрации азота по толщине азотированного слоя определяли замером содержания азота от края к сердцевине образца, используя энергодисперсионный микроанализатор EDS INCA Energy+ и волнового (анализатор Wave) (рис. 2, 3). Наличие нитридного слоя и его толщина также подтверждаются металлографическим анализом (рис. 2, 3).

Полученные данные по распределению концентрации азота позволяют предсказать появление соответствующих нитридных фаз.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что суммарная погрешность определения толщины азотированного слоя по разработанной методике не превышает 10%, а по твердости поверхности – 6%, а распределения концентрации азота по толщине слоя ~13%, что приемлемо для практики. Таким образом, разработанная программа «NITROTOMOS» может быть использована в производственной практике и в экспериментальных работах для прогнозирования толщины, твердости и распределения концентрации азота по толщине азотированного слоя стали при различных режимах азотирования.

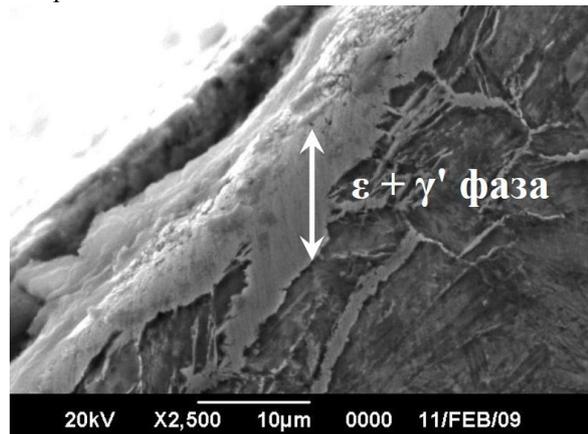
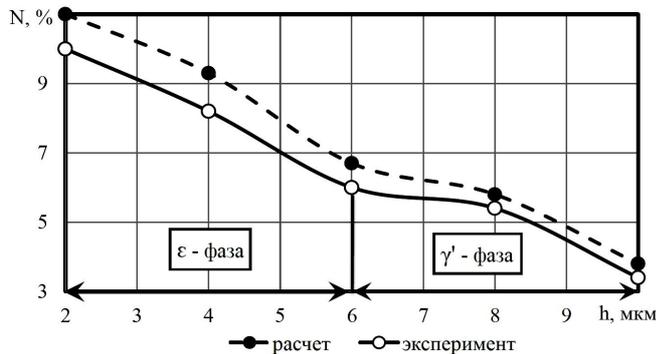


Рис. 2. Профили концентрации азота по толщине нитридной зоны и микроструктура азотированного слоя на стали 18X2H4MA

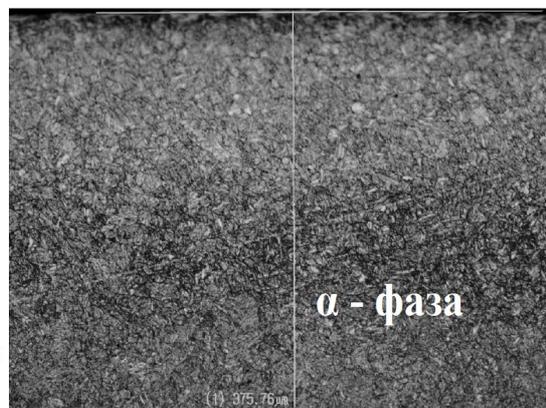
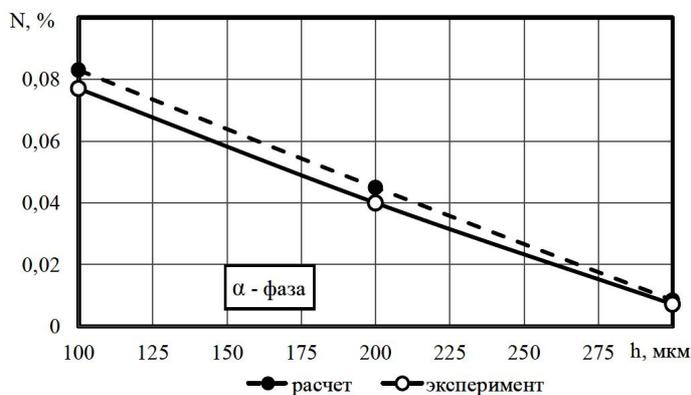


Рис. 3. Профили концентрации азота по толщине зоны внутреннего азотирования и микроструктура азотированного слоя на стали 18X2H4MA (X200)

## Заключение

1. На основе анализа физико-химических процессов, происходящих при азотировании, разработана математическая модель, которая позволяет методом компьютерного моделирования выявить влияние основных технологических факторов на качество азотированного слоя и установить предельно-допустимые отклонения этих параметров для получения требуемых показателей качества азотированного слоя.

2. Использование разработанной программы NITROTOMOS и ППП STATISTICA позволит определить наиболее рациональные технологические режимы азотирования, обеспечить стабильное качество азотированного слоя, сократить затраты на проведение опытных работ при разработке технологического процесса азотирования.

## Литература

1. Жуков А.А. Статистический анализ влияния химического состава сталей на показатели качества азотированного слоя / А.А. Жуков, Л. А. Шапова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 1. – С. 48-52.

2. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7824 на разработку программы «NITROTOMOS (азотированный слой)» / А.А. Жуков, Л.А. Шапова // Государственный координационный центр информационных технологий, Отраслевой фонд алгоритмов и программ. Регистрация в государственном банке данных № государственной регистрации 50200700471.

3. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.-И. Шпис, З. Бомер. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.

4. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / В.М. Зинченко. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.

Поступила в редакцию 31.05.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедры «Материаловедение литья и сварки» А.А. Шатульский, ГОУ ВПО Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия.

## АНАЛІЗ І ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АЗОТУВАННЯ ЗУБЧАТИХ КОЛІС ГТД

*А.О. Жуков, Л.О. Хасанова*

Виявлено взаємозв'язок мазкі сталі з показниками якості азотованого шару. Отримані регресійні статистичні моделі для оцінки і прогнозу якості азотованого шару залежно від хімічного складу сталі. Розроблена математична модель і алгоритм розрахунку показників якості азотованого шару від технологічних чинників і хімічного складу сталі, що забезпечує можливість комп'ютерного управління якістю зміцненого шару, а також оптимізації технологічних режимів азотування. Запропоновані рекомендації по вдосконаленню технологічного процесу азотування зубчатих коліс для ГТД за рахунок використання методів статистичного аналізу і моделювання.

**Ключові слова:** азотування, математичне моделювання, статистичний аналіз, зубчаті колеса, показники якості шаруючи.

## THE ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF THE NITRIDING TECHNOLOGY OF GAS-TURBINE ENGINE GEAR WHEELS

*A.A. Gukov, L.A. Khasanova*

The mathematical model and algorithm for calculating the quality of the nitrided layer from the technological factors and the chemical composition of steel, which enables computer control of the quality of the hardened layer, as well as optimization of technological modes of nitriding are developed. Recommendations for improving the process of nitriding of gears for gas-turbine engine by the use of statistical analysis and modeling are offered.

**Key words:** nitriding, mathematical modeling, the statistical analysis, gear wheels, parameters of layer quality.

**Жуков Анатолий Алексеевич** - канд. техн. наук, проф., проф. кафедры металловедения, литья и сварки Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева «РГАТА», Рыбинск, Россия.

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