

ВЛИЯНИЕ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Людмила Петровна Фомина, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.

Проведена экспериментальная оценка эксплуатационных свойств теплостойкой стали ВКС-5, по критериям выносливости зубьев при изгибе, после упрочнения по технологии основанной на газовой цементации и цементации при пониженном давлении. Показано, что более высокое сопротивление усталости после вакуумной цементации связано с более высоким качеством цементированного слоя. Определены характеристики цементированного слоя и режимы вакуумной цементации, отвечающие высокой циклической долговечности.

The experimental assessment of operational properties temperature constancy steel VKS-5, by criteria of endurance teeth is lead at a bend, after hardening on technology based on gas cementation and cementation at low blood pressure. It is shown, that higher resistance of weariness after vacuum cementation is connected with higher quality cementation a layer. Characteristics of cemented layers and modes, vacuum carburizing high cyclic durability.

Ключевые слова: зубчатые колеса, вакуумная и газовая цементация, цементированный слой, усталостные испытания, предел выносливости, циклическая долговечность.

Keywords: gear wheels, acetylene vacuum cementation and gas cementation, cementation a layer, fatigue tests, a limit of endurance, cyclic durability.

Зубчатые колеса авиационного ГТД размещаются в передней и задней коробках приводов и осуществляют привод к различным агрегатам двигателя (топливным и масляным насосам, генераторам и др.), а также обслуживают работу отдельных узлов самолета - поворачивают сопла, передают движение на закрылки, выполняют другие функции [1]. Долговечность цементированных зубчатых колес определяется в первую очередь их свойствами: выносливостью зубьев при изгибе, контактной выносливостью, износостойкостью, обеспечивающих надежность работы в зависимости от эксплуатационных, конструктивных и технологических факторов. Только в случае их достаточности для условий эксплуатации, зубчатые колеса будут успешно сопротивляться рабочим напряжениям, возникающим в зацеплении [2-3].

Одним из основных условий работоспособности зубчатых колес авиационных двигателей является высокая выносливость зубьев при изгибе. При передаче зубчатым колесом крутящего момента в зацеплении действует окружная сила. Под действием этой силы у основания зуба возникают напряжения изгиба, которые изменяются по пульсирующему циклу. Действие циклических нагрузок провоцирует развитие усталостного разрушения основания зуба. Для его предупреждения авиационные зубчатые колеса изготавливают с нешлифованным основанием зубьев [2]. Перед ХТО зубчатые колеса нарезают специальной фрезой, обеспечивающей подрезание ножки зуба на величину припуска при шлифовании. При снятии припуска обеспечивается плавный переход шлифованного профиля зуба к нешлифованному основанию. В этом случае у основания зуба сохраняются остаточные напряжения сжатия, величина которых по данным работы [2] может составлять 300...400 МПа.

Важнейшим направлением повышения выносливости зубьев при изгибе и улучшение работоспособности по другим критериям является применение вакуумных и ионных процессов цементации взамен технологий, основанных на процессе газовой цементации в шахтных печах. В процессе газовой цементации в шахтных печах упрочнение зубчатых колес проходит в окислительной атмосфере, что сопровождается поверхностным окислением, развитием внутреннего окисления легирующих элементов [3] и обезуглероживанием. В работе [4] показано, что развитие этих процессов сопровождается заметным снижением выносливости зубьев при изгибе. С учетом этого обстоятельства были проведены испытания, по результатам которых предстояло оценить, насколько можно повысить циклическую прочность при использовании вакуумной цементации.

Также были проведены испытания, позволяющие определить характеристики цементированного слоя и режимы вакуумной цементации, отвечающие высокой циклической долговечности.

Учитывая, что сопротивление усталостному разрушению зависит от большого числа факторов [5] форма образцов и методика испытаний, были приближены к условиям, характерным для основания зуба колеса. Образцы из стали 16Х3НВФМБ-Ш (ВКС-5) (0,18 % С, 2,82 % Cr, 1,43 % Ni, 1,34 % W, 0,43 % V, 0,56 % Mo, 0,17 % Nb, 0,88 % Si, 0,67 % Mn) в месте возможного разрушения имели закругление радиусом 3 мм, что имитирует ножку зуба колеса $m = 3$ мм, $z = 35$, $\alpha = 25^\circ$ (рис. 1) [2]. Испытания проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 25.502-79, на установке ИС5116 [6]. Образцы при консольном закреплении (как и зуб колеса) подвергали знакопеременному изгибу. Отличие состояло в том, что использовали не пульсирующий, а симметричный - наиболее жесткий цикл нагружения. Напряжения амплитуды цикла изменяли от 700 до 1200 МПа. Для сердцевины, имеющей $\sigma_b = 1300$ МПа, амплитуды напряжений цикла составляли (0,54...0,92) σ_b , для цементированного слоя при $\sigma_b = 2200$ МПа - (0,32...0,54) σ_b .

Испытывали образцы после газовой и вакуумной цементации (4 партии по 16 шт. каждая). Перед цементацией поверхность радиусной части образца, в которой развиваются процессы усталостного разрушения, подвергали механической полировке. Удаляли грубые риски и царапины - технологические концентраторы напряжений. Газовую цементацию образцов проводили в шахтной печи, с садкой зубчатых колес на эффективную толщину слоя 0,6...0,9 мм и 1,05...1,30 мм с последующей термической обработкой.

Вакуумную цементацию образцов проводили на универсальной лабораторной установке, а последующую термическую обработку (высокий отпуск, закалку, обработку холодом и низкий

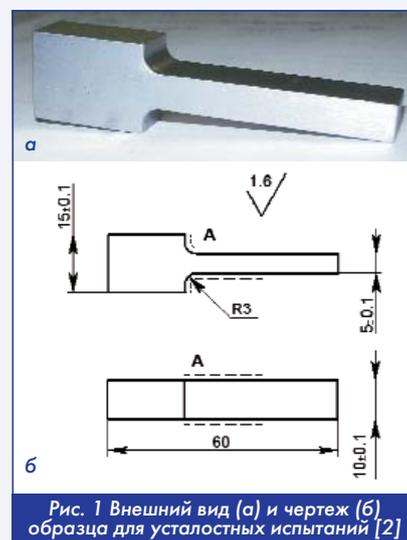


Рис. 1 Внешний вид (а) и чертёж (б) образца для усталостных испытаний [2]

отпуск) - с использованием вакуумного оборудования фирмы Irsen. При разработке режимов вакуумной цементации исходили из следующих задач: 1) сравнение циклической прочности при вакуумной и газовой цементации; 2) оценка влияния на циклическую долговечность характеристик цементированного слоя после вакуумной цементации - концентрации углерода на поверхности и эффективной толщины слоя.

Результаты усталостных испытаний после вакуумной и газовой цементации соотносили с микроструктурой цементированного слоя и сердцевины, характеристиками слоя, распределением твердости. В 1-й партии образцов после газовой цементации эффективная толщина цементированного слоя составляла 0,7 мм, а концентрация углерода на поверхности - 0,86 %. Во 2-й партии образцов эффективная толщина слоя была равной 1,3 мм, а поверхностная концентрация 1,33 % С (табл. 1). Вакуумную цементацию проводили по специально разработанным режимам для обеспечения сравнимых характеристик цементированного слоя. В 3-й партии образцов была обеспечена эффективная толщина слоя 0,7 мм с концентрацией углерода на поверхности 1,07 %. В 4-й партии образцов - эффективная толщина слоя равна 1,35 мм, а поверхностная концентрация углерода 1,45 % (табл. 1).

Эффективная толщина слоя, которую определяли по кривым микротвердости после полной ХТО, была обеспечена практически одинаковой для образцов сравниваемых способов науглероживания (табл. 1). Значения концентрации углерода на поверхности оказались достаточно близкими, однако, при металлографическом анализе было установлено значительное обезуглероживание поверхностного слоя образцов после газовой цементации. Измерение концентрации углерода после удаления слоя толщиной примерно 0,05 мм показало, что на образцах 1-й партии с $h_{эф} = 0,7$ мм концентрация углерода составляла 0,96 %, а на образцах 2-й партии с $h_{эф} = 1,3$ мм - 1,67 %.

Исследование микроструктуры приповерхностной зоны цементированного слоя образцов после газовой цементации показало, что на образцах обеих партий наблюдается зона обезуглероживания. У образцов 2-й партии (с $h_{эф} = 1,3$ мм) имеется переотщепление частицами карбидной фазы поверхностной зоны, что и обусловило повышенную (1,67 %) концентрацию углерода за зоной обезуглероживания. Обезуглероживание практически не отражается на уровне твердости по Роквеллу, однако, проявляется в снижении микротвердости в приповерхностной области (рис. 2).

Кривые усталости на базе $5 \cdot 10^6$ циклов (рис. 3) отражают более высокое сопротивление усталости образцов после вакуумной цементации. Предел выносливости σ_{-1} при эффективной толщине слоя 0,7 мм составил 980 МПа при вакуумной цементации и 800 МПа при газовой цементации (табл. 1). Эффект от применения вакуумной цементации составляет примерно 22 %. При эффективной толщине слоя 1,3 мм различие в неразрушающем напряжении еще больше - 26 % (σ_{-1} : 910 и 720 МПа соответственно) [6].

Следствием более низкой циклической прочности при газовой цементации является развитие процессов окисления в тонком поверхностном слое. Эти процессы подробно исследованы в работах И.Я. Архипова [4] и В.М. Зинченко [3]. Положительный эффект от применения вакуумной цементации обусловлен более высоким качеством цементированного слоя.

Для определения характеристик цементированного слоя и режимов вакуумной цементации отвечающих высокой цикличес-

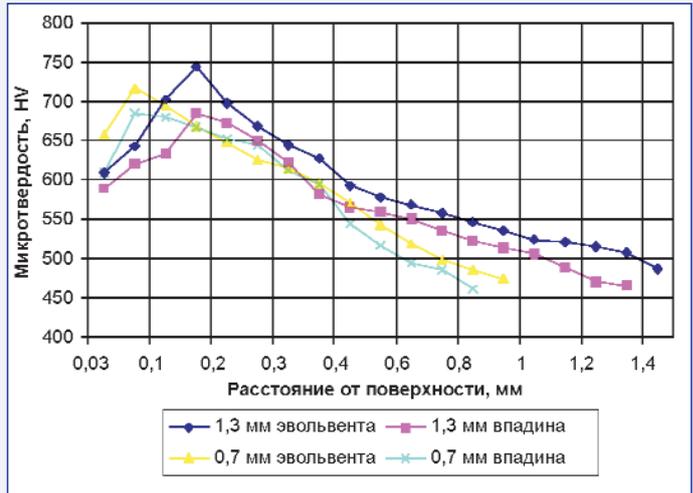


Рис. 2 Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя после газовой цементации образцов с эффективной толщиной слоя 1,3 мм и 0,7 мм [6]

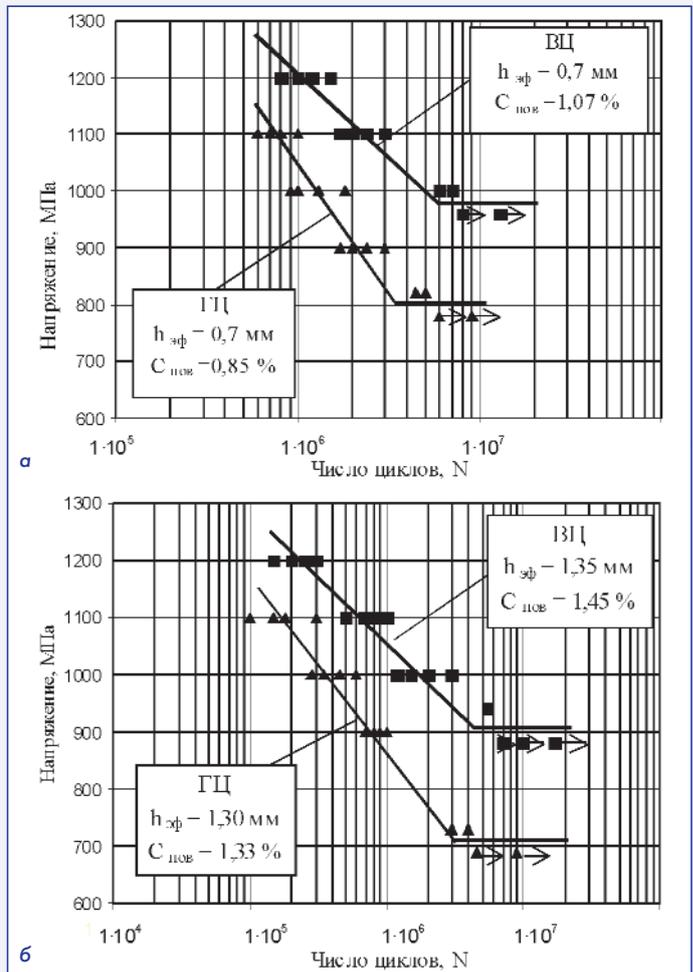


Рис. 3 Кривые усталости образцов стали ВКС5 после газовой (ГЦ) и вакуумной (ВЦ) цементации для эффективной толщины слоя 0,7 мм (а) и 1,3 мм (б) [6]

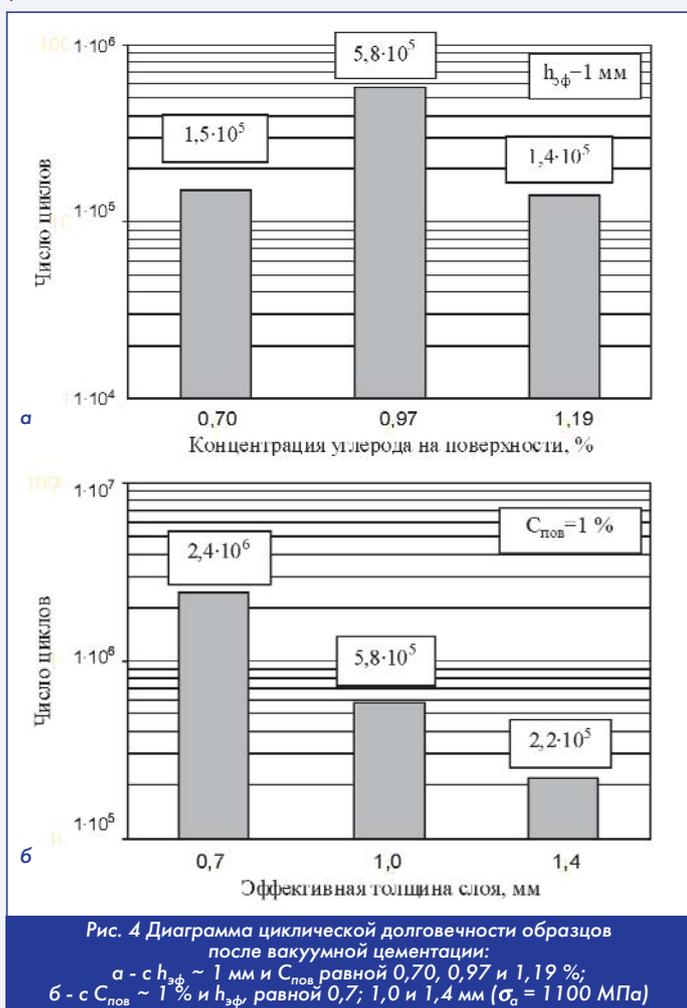
Характеристики цементированного слоя экспериментальных образцов и пределы циклической прочности стали ВКС5							
Способ цементации	№ партии	Характеристики цементированного слоя			Толщина обезуглероженного слоя, мкм	HRC	σ_{-1} , МПа
		$h_{эф}$, мм	$C_{пов}$, %	$C_{0,05}$, %			
Газовая	1	0,70	0,86	0,96	10	58,0	800
	2	1,30	1,33	1,67	20	63,5	720
Вакуумная	3	0,70	1,07	1,07	0	59,0	980
	4	1,35	1,45	1,45	0	63,0	910

кой долговечности, испытывались образцы с различной концентрацией углерода на поверхности равной: 0,7; 1,0; 1,2 %, при постоянной эффективной толщине слоя $\sim 1,0$ мм; и образцы с постоянной концентрацией углерода на поверхности $\sim 1,0$ % и разной эффективной толщиной слоя: 0,7; 1,0 и 1,4 мм. Испытания на усталость [6] проводили при напряжении амплитуды цикла σ_r равной 1100 МПа. На каждый режим обработки испытывали по 7 образцов. Определяли среднее значение долговечности пяти образцов; верхнее и нижнее значения не учитывали.

Циклическая долговечность образцов после вакуумной цементации при $\sigma_a = 1100$ МПа			
№ образца	Характеристики слоя		Число циклов
	$h_{эф}$, мм	$C_{пов}$, %	
1	0,95	0,70	$1,5 \cdot 10^5$
2	1,00	0,97	$5,8 \cdot 10^5$
3	0,95	1,19	$1,4 \cdot 10^5$
4	0,70	1,07	$2,4 \cdot 10^6$
5	1,40	1,04	$2,2 \cdot 10^5$

Концентрация углерода на поверхности заметно влияет на циклическую долговечность (табл. 2, рис. 4,а). Наиболее высокой выносливостью отвечает концентрация углерода близкая к 1 %. При такой концентрации в приповерхностной части цементованного слоя образуются мелкие дисперсные карбиды цементитного типа и частицы специальных карбидов. Вероятно, что такое строение не сопровождается развитием излишней хрупкости, обеспечивает высокое сопротивление как зарождению, так и развитию трещины усталости. При концентрации углерода 0,7 % карбидная фаза в слое практически отсутствует, что отражается на уровне его упрочнения (650 НВ). При концентрации углерода на поверхности ~ 1,2 % образуется достаточно развитая активная карбидная зона толщиной порядка 0,15 мм, приводящая к снижению пластичности, облегчению развития трещины усталости.

Полученный результат согласуется с литературными данными [3]. Для низколегированных сталей рекомендуется обеспечивать концентрацию углерода в пределах 0,8...1,0 % С. Для теплостойкой комплексно-легированной стали ВКС5, склонной к пересыщению, концентрация углерода 0,9...1,0 % С у основания зуба колеса может быть принята за оптимальную, при условии ограниченной объемной доли карбидной фазы и высокой дисперсности ее частиц.



Оценка влияния эффективной толщины слоя показала снижение циклической долговечности при увеличении толщины слоя свыше 0,7 мм (табл. 2, рис. 4,б). Увеличение толщины слоя до 1,4 мм снижает долговечность в 10 раз. Необходимость ограничения толщины слоя у основания зуба подтверждена в ряде работ [2-3]. Основной причиной снижения сопротивления усталости при увеличении толщины слоя свыше 0,7 мм считают [2] уменьшение в поверхностной зоне уровня остаточных напряжений сжатия из-за неблагоприятного их распределения.

Выводы

На основе результатов сравнительных испытаний на усталость образцов, имитирующих условия работы основания зуба зубчатого колеса, установлено более высокое сопротивление усталостному разрушению стали ВКС5, упрочненной по технологии вакуумной цементации. По сравнению с газовой цементацией предел выносливости (σ_{-1}) выше примерно на 22 % при эффективной толщине диффузионного слоя 0,7 мм и на 26 % при толщине 1,3 мм.

Установлено влияние характеристик цементированного слоя на циклическую долговечность, наибольшее значение которой соответствует концентрации углерода на поверхности 0,9...1,0 % и эффективной толщине цементированного слоя у основания зуба равной 0,7 мм. Полученные результаты согласуется с известными показателями, установленными ранее для сталей, упрочняемых газовой цементацией.

Результаты исследований показали, что вакуумная цементация открывает перспективу увеличения несущей способности и долговечности зубчатых колес. Её применение дает возможность в достаточно широком диапазоне изменять характеристики диффузионных слоев - их насыщенность, структурное состояние, фазовый состав и, как следствие, механические свойства. Для эффективного использования нового процесса поверхностного упрочнения разработаны режимы вакуумной цементации [6], обеспечивающие характеристики диффузионных слоев, отвечающие основным критериям работоспособности зубчатых колес - циклической прочности при изгибе, износостойкости, контактной выносливости.

Литература

1. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин и др. - М.: Высшая школа, 2001. - 493 с.
2. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач / М.Д. Генкин, М.А. Рыжов, Н.М. Рыжов. - М.: Машиностроение, 1981. - 232 с.
3. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. - М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.- 303 с.
4. Архипов И.Я., Батырев В.А., Полоцкий М.С. Внутреннее окисление в цементованных слоях легированных сталей // МИТОМ. - 1972. - № 6. - С. 40-44.
5. Херцбергер Р.В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов: Пер. с англ. - М.: Металлургия, 1989. - 576 с.
6. Фомина Л.П. Разработка и анализ технологии ионной и вакуумной цементации зубчатых колес авиационных двигателей / Дисс. канд. техн. наук. - М. - 2009. - 342 с.

Связь с автором: fominalp@yandex.ru

