

УДК 620.178

## КОНТАКТНАЯ ВЫНОСЛИВОСТЬ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ТЕПЛОСТОЙКОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ РАЗНЫХ ВИДОВ ЦЕМЕНТАЦИИ

© Светлана Альбертовна Пахомова, Мария Юрьевна Рыжова,  
Равел Садртдинович Фахуртдинов, Марина Александровна Макушина,  
Артем Игоревич Пикалов, Виктория Викторовна Усова, Никита Алексеевич Юшин  
Московский Государственный Технический Университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия  
[mgtu-mt8@yandex.ru](mailto:mgtu-mt8@yandex.ru)

*Аннотация.* В работе изложено исследование технологии цементации зубчатых колес. Зубчатые колеса часто подвергаются воздействию значительных нагрузок. Кроме того, они должны быть устойчивы к экстремальным изменениям температуры. Поэтому долговечность и надежность зубчатых передач имеют решающее значение для оборудования широкого назначения.

Основная причина повреждения зубчатых колес связана с развитием процессов контактной усталости и изнашивания. Установлено, что возможность повышения работоспособности зависит от структурного состояния цементованного слоя.

*Ключевые слова:* зубчатые колеса, теплостойкие стали, газовая цементация, ионная цементация, вакуумная цементация, ионная нитроцементация, контактная выносливость, износостойкость.

## CONTACT FATIGUE AND WEAR RESISTANCE OF HEAT-RESISTANT STEEL AFTER DIFFERENT KINDS OF CARBURIZING

© S. Pakhomova, M. Ryzhova, R. Fakhurtdinov, M. Makushina,  
A. Pikalov, V. Usova, N. Ushin

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

[mgtu-mt8@yandex.ru](mailto:mgtu-mt8@yandex.ru)

*Annotation.* The paper describes a study of technology of carburizing gear wheels. They are often exposed to heavy loads. Furthermore, they must be resistant to extreme changes in temperature. Therefore, the reliability of the gear wheels are critical for general-purpose equipment.

The main cause of damage to the gear wheels associated with the development of contact fatigue and wear processes. It has been established that the possibility of increasing the properties depends on the structural state of the carburizing layer.

*Keywords:* gear wheels, heat-resistant steel, gas carburizing, ion carburizing, vacuum carburizing, ion carbonitriding, contact fatigue, wear resistance.

**Введение.** Сопротивление контактной усталости и изнашиванию имеет важное значение для многих узлов трения, включая зубчатые передачи, работающие при высоких окружных скоростях и удельных нагрузках. В газотурбинных двигателях (ГТД) к таким передачам относят зубчатые колеса центрального конического привода, окружная скорость которых составляет 140 м/с [1]. Как указано в работе [2], при нарушении нормального режима работы (вибрации, концентрация нагрузки), возможен разрыв несущей пленки смазочного материала. Возникает металлический контакт микронеровностей, приводящий к росту силы трения и скоростей развития процессов усталости и изнашивания. Последняя особенно значительна на головках и ножках зубьев, где велики относительные скорости скольжения. В результате искажается эвольвентный профиль зуба, что служит причиной роста динамических нагрузок, увеличения опасности излома зуба.

Повышенные требования к износостойкости характерны также для цементованных зубьев колес шестеренчатых насосов ГТД [3, 11]. Для них действует жесткое требование - износ рабочих поверхностей зубьев не должен превышать 0,1 мм, иначе резко падает производительность насоса. Такое требование действует в условиях трения, при которых перекачиваемый авиационный керосин практически не обладает смазывающей способностью. Поэтому зубья шестерен насоса работают в условиях металлического контакта микронеровностей. Изношенные поверхности головок и ножек зубьев содержат следы задира, множество царапин и борозд, свидетельствующих о преобладании двух механизмов скоростного изнашивания – адгезионного взаимодействия и микрорезания выступами микронеровностей и продуктами изнашивания в виде твердых абразивных частиц.

Работоспособность цементованных зубчатых колес зависит от исходного структурного состояния цементованного слоя, которое кроме химического состава стали определяется технологией химико-термической обработки (ХТО). К числу факторов, зависящих от технологии ХТО, относятся: насыщенность цементованного слоя углеродом; морфология мартенсита и концентрация углерода в нем; объемная доля избыточной карбидной фазы и ее распределение по толщине приповерхностной зоны цементованного слоя; наличие остаточного аустенита.

Все указанные выше структурные характеристики, через которые проявляется технологическая наследственность, должны оказывать влияние на характер изменений фаз цементованного слоя в процессе использования и, как следствие, на эксплуатационные характеристики. Определяющим фактором следует считать насыщенность цементованного слоя углеродом, так как последний опосредствованно через морфологию мартенсита и объемную долю карбидной фазы влияет на механизм пластической деформации. На состав и строение фаз цементованного слоя влияют способы и режимы науглероживания.

**Цель работы:** установить, какое влияние оказывает технологическая наследственность цементации (газовой, ионной и вакуумной) на износостойкость и контактную выносливость высоконагруженных шестерен.

**Методика и объекты исследования.** Объектами исследований служили роликовые образцы (диаметром 30,2 мм и шириной 18 мм) из стали 16ХЗНВФМБ-Ш ( $C=0,19\%$ ;  $Cr = 2,9\%$ ;  $Ni = 1,3\%$ ;  $W = 1,2\%$ ;  $V = 0,55\%$ ;  $Nb = 0,15\%$ ). Химический состав стали определяли методом микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе «*Camscan-IV*» с микроанализатором «*Inca*».

Роликовые образцы подвергали газовой цементации (ГЦ), вакуумной цементации (ВЦ), ионной цементации (ИЦ) и ионной нитроцементации (ИНЦ). Образцы проходили типичную для зубчатых колес ХТО: ГЦ, ВЦ, ИЦ или ИНЦ при 930...950 °С, отпуск при 650 °С, закалку в масло от 910 °С, обработку холодом при – 70 °С, низкий отпуск при 280 °С и шлифование, которым удаляли припуск. ГЦ проводили в шахтной печи Ц-105 в атмосфере синтина. ИЦ проводилась на оборудовании и по методике [4] в атмосфере ацетилена, разбавленного газовой смесью аргона с водородом, а ИНЦ - в газовой среде ацетилена и диссоциированного аммиака. Время процесса было выбрано с таким расчетом, чтобы обеспечить насыщенность цементованного слоя той же степени, что и после газовой цементации. ВЦ проводили на опытно-промышленной установке, оснащенной управляющим компьютером и системами автоматического регулирования технологических параметров. Ацетилен подавали циклически в виде чередования активных стадий, когда в рабочую камеру подавали цементационный газ, и пассивных (диффузионных) стадий при выключенной подаче газовой среды по методике [5, 12].

Время процесса было выбрано с таким расчетом, чтобы обеспечить насыщенность цементованного слоя примерно такой же как и при газовой цементации.

Количественный анализ микроструктуры карбидной (карбонитридной) зоны выполняли на автоматическом анализаторе изображений «Квантимет-720». Распределение углерода по толщине диффузионного слоя оценивали спектральным методом на эмиссионном многоканальном спектрометре фирмы «Baird» с обработкой результатов в соответствии с ГОСТ 18895.

Твердость измеряли по методу Роквелла, регламентированному ГОСТ 9013, алмазным конусом с общей нагрузкой 150 кг.

Испытания на контактную выносливость проводили по схеме качения с проскальзыванием (6 %) по ГОСТ 25.501 на роликовой машине Ш17. В качестве смазочного материала использовали масло дизфирного типа при температуре  $175 \pm 5$  °С. За критерий долговечности принимали число циклов до образования выкрашивания на поверхности роликового образца размером не менее ширины рабочей дорожки, равной 8 мм.

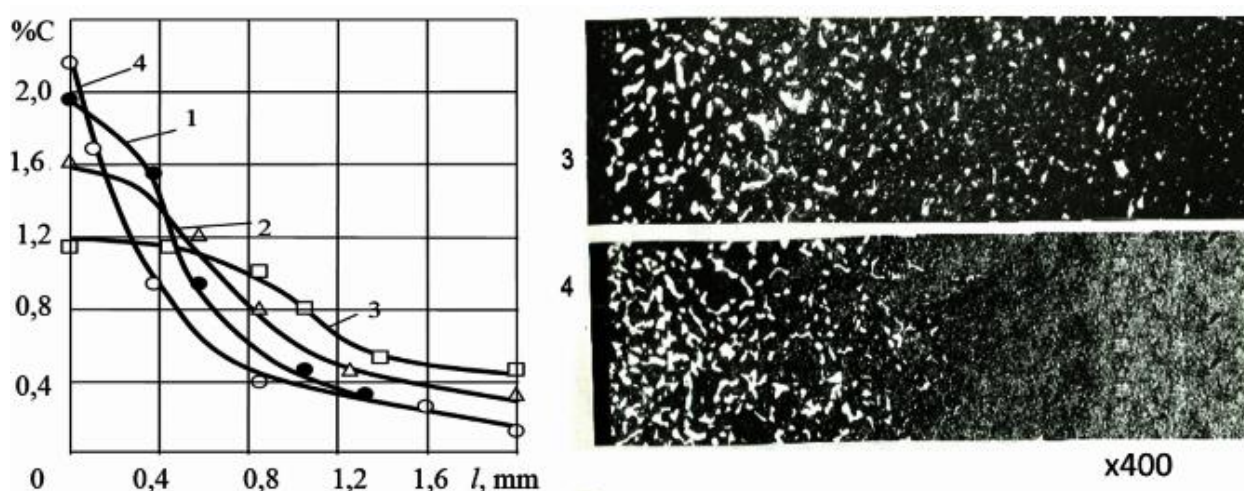
Износостойкость цементованной поверхности оценивали путем испытаний образцов на машине «Шкода-Савин». Истирание участка поверхности выполняет диск из твердого сплава ВК6 диаметром 30 мм и шириной 5 мм. Скорость вращения диска составляла 500 об./мин., рабочая нагрузка 50 Н. Скорость изнашивания определяли как отношение объема вытертой лунки ко времени изнашивания, при котором глубина лунки достигала 0,1 мм.

**Проведение экспериментов и их обсуждение.** Объекты исследования подвергали как газовой цементации, так и новым процессам, осуществляемым нагревом низко температурной плазмой тлеющего разряда - ионной цементации и ионной нитроцементации, а также вакуумной цементации. ВЦ - цементация в ацетилене низкого давления – перспективный процесс, получивший широкое применение за рубежом. Авторы работ [6] назвали вакуумную цементацию в ацетилене последним достижением в области развития технологии науглероживания. Для ее реализации зарубежные фирмы производят вакуумные автоматизированные установки, обеспечивающие диффузионное насыщение углеродом и последующую малодеформационную «сухую» закалку в потоке азота.

Различную насыщенность диффузионного слоя углеродом получали проведением одностадийных (при постоянных технологических параметрах) и двухстадийных режимов.

Последний осуществляли при постоянной температуре, но со ступенчатым режимом подачи карбюратора. Проведение процесса в две стадии устраняет пересыщение поверхности углеродом, снижает плотность карбидов, увеличивает эффективную толщину слоя. На второй стадии при отсутствии поступления углерода из газовой среды источником углерода для формирования слоя служат мелкие карбидные частицы. Их растворение и диффузионное перераспределение углерода повышают легированность твердого раствора и однородность строения карбидной зоны: уменьшается разница в размере карбидных частиц, выравнивается плотность их распределения.

Исследования показали, что разная концентрация углерода (рис. 1) в цементованном слое стали 16ХЗНВФМБ-Ш обусловила различное состояние структуры мартенсита, характеристики качества поверхности и долговечность.



**Рис. 1.** Распределение углерода С по толщине и микроструктура цементованного слоя стали 16ХЗНВФМБ-Ш, после газовой цементации ( $t = 940 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , общее время  $\square = 10 \text{ ч}$ ) с различной продолжительностью второй стадии  $\square_2$ : 1 - 3 ч; 2 - 4 ч; 3 - 5 ч; 4 - 1 ч

Различия обусловлены разной долей сформированной карбидной фазы. Объемная доля карбидной фазы влияет на степень локализации микропластической деформации и уровень развития процессов релаксации локальных напряжений в мартенситной матрице под нагрузкой. Повышенная способность мартенситной матрицы к релаксации напряжений уменьшает опасность появления участков с критической концентрацией микродеформации и, следовательно, способствует несколько большему поглощению энергии. Определено, что оптимальным является соотношение длительностей первой и второй стадии процесса газовой цементации 60 и 40 %. При этом доля избыточной карбидной фазы в диффузионном слое составляет  $\sim 15 \%$ , а твердость поверхности  $\sim 62 \text{ HRC}$  (табл. 1).

Анализ полученных данных позволяет следующим образом объяснить различную эффективность ГЦ по указанным режимам. В том случае, когда приповерхностный слой содержит крупные и близко расположенные друг к другу карбидные включения, а остаточный аустенит отсутствует, локальные напряжения в их окрестности велики и соизмеримы с пределом текучести материала, что при наложении циклической нагрузки

облегчает проявление эффекта микротекучести и способствует раннему зарождению усталостной трещины.

Кроме того, пониженная концентрация углерода в поверхностной зоне облегчает шлифование и уменьшает опасность образования прижогов. И то и другое значительно повышает качество изделий [7, 8].

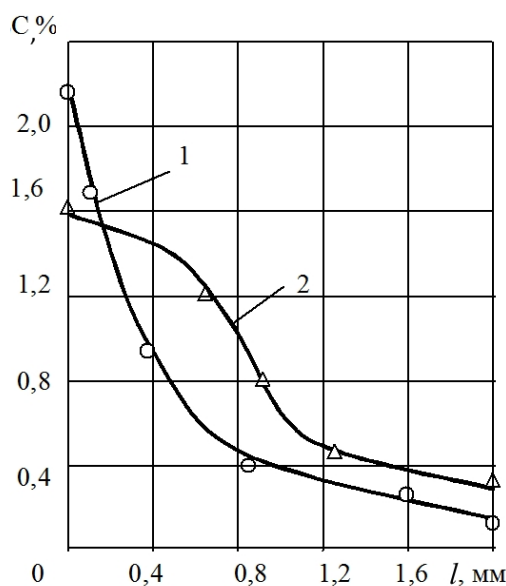
Таблица 1 - Контактная выносливость стали 16ХЗНВФМБ-Ш после разных видов цементации

№ п/п	Режим ХТО	Объемная доля карбидов в слое 0...20 мкм	Твердость поверхности, HRC	Долговечность, $N_{50} \cdot 10^{-6}$ циклов
1	ГЦ - 1 стадия	25	63	11
2	ГЦ - 2 стадии $t=940^\circ$ $\tau_{\text{общ}}=10\text{ч}$	$\tau_2=3\text{ ч}$	63	17
		$\tau_2=4\text{ ч}$	62	16
		$\tau_2=5\text{ ч}$	60	8,4
3	ИЦ - 1 стадия $t=950^\circ$ ; $\tau=2,5\text{ ч}$	25	63	12
4	ИЦ - 2 стадии $t=950^\circ$ , $\tau_1=\tau_2=1,25\text{ ч}$	15	62	16,8
5	ИНЦ - 1 стадия $t=950^\circ$ , $\tau=2,5\text{ ч}$	20	63...64	18,2
6	ИНЦ - 2 стадии $t=950^\circ$ , $\tau_1=\tau_2=1,25\text{ ч}$	12	62...63	25
7	ВЦ (циклическая) $\Sigma\tau_a:\Sigma\tau_n=0,3...0,4$ $t=940^\circ$ , $\tau=6\text{ ч}$	17...20	61...62	26

Кардинальным решением основных вопросов в области ХТО является применение новых процессов - ионной цементации или ионной нитроцементации, признанных в Японии, Германии и США наиболее приоритетными процессами формирования несущих диффузионных покрытий. Высокая эффективность этих процессов подтверждена и в исследованиях [9, 10]. Обработка в плазме тлеющего разряда позволяет не только в несколько раз сократить длительность выдержки и повысить уровень механических свойств, но и достичь при этом принципиально новых эффектов, связанных с возможностью управления фазовым составом и структурой диффузионного слоя. Она обеспечивает равномерное науглероживание за счет точного повторения плазмой тлеющего разряда всех контуров детали и самопроизвольной конвекцией газовой среды, ионизированной разрядом. Исполнительные механизмы установок допускают быстрое изменение по ходу процесса температуры, давления, состава технологической атмосферы и создают условия для проведения различных комбинированных режимов диффузионного насыщения для создания слоя заданной насыщенности.

При однотипных режимах ИЦ и ГЦ, распределение углерода в диффузионном слое, его структура и фазовый состав не отличаются от тех, которые характерны для ГЦ и приведены выше (рис. 2).

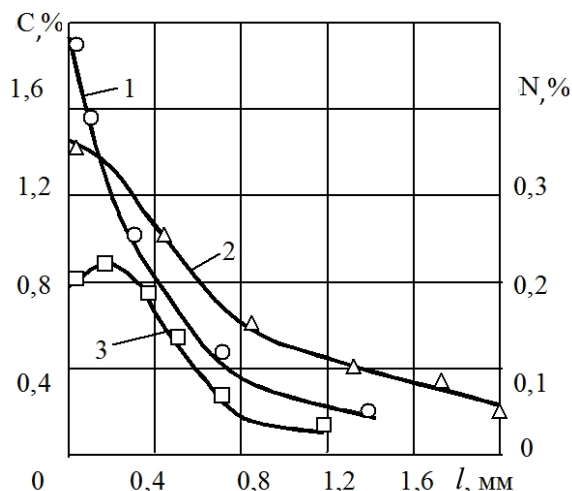
Присутствие азота при ИНЦ отражается на фазовом составе и строении избыточных фаз. Наряду с основным карбонитридом  $M_3(CN)$ , находящимся в смеси с небольшим количеством  $Cr_7C_3$ , в приповерхностном слое формируется мелкодисперсная комплексно-легированная нитридная фаза  $MN$  и  $M_2N$  на основе нитридов хрома  $CrN$  и  $Cr_2N$ . Количество нитридной фазы составляет  $\sim 3\%$ .



**Рис. 2.** Распределение углерода  $C$  по толщине цементованного слоя стали 16ХЗНВФМБ-Ш, подвергнутой ионной цементации ( $t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ , общее время  $\tau = 2,5$  ч): по однотактному (1) и двухтактному ( $\tau_1 = \tau_2$ ) (2) режимам

При однотактном режиме ИНЦ формируется диффузионный слой с меньшим пересыщением поверхности углеродом при более пологом его распределении, чем при таком же режиме ИЦ (рис.3). Это приводит к образованию более протяженной активной карбонитридной зоны с несколько меньшей объемной долей частиц (см. табл. 1). Двухтактный режим ИНЦ значительно увеличивает эффективную толщину слоя, хотя средние размеры частиц для этих процессов практически одинаковы.





**Рис. 3.** Распределение углерода C (1, 2) и азота N (3) по толщине нитроцементованного слоя стали 16ХЗНВФМБ-Ш, подвергнутой ионной нитроцементации ( $t = 950$  °С, общее время  $\tau = 2,5$  ч): 1 - по одностадийному и 2 - двухстадийному ( $\tau_1 = \tau_2$ ) режимам

Необходимо особо отметить равномерность толщины диффузионного слоя по профилю деталей после ХТО в плазме тлеющего разряда.

Одинаковое структурное состояние стали после равнозначных режимов ГЦ и ИЦ обеспечивает одинаковое изменение структуры и свойств при испытаниях. Однако, при прочих равных условиях, несколько большая эффективность ВЦ, ИЦ и ИНЦ обусловлена большей равномерностью распределения карбидной фазы в слое, так как при этом уменьшается опасность локализации напряжений в приграничных объемах.

Сформированная при одностадийном режиме ИНЦ активная карбонитридная зона с несколько меньшей объемной долей частиц и мартенситной матрицей, легированной азотом, оказывается более устойчивой к контактным нагрузкам, чем цементованная поверхность. Технологическая наследственность проявляется у нитроцементованных слоев так же как и у цементованных. У образцов с большой долей карбонитридной избыточной фазы (после одностадийной ИНЦ) долговечность равна 18,2 млн. циклов, тогда как у образцов с менее развитой избыточной фазой (после двухстадийного режима ИНЦ) она выше на 40...50 % (см. табл. 1).

ВЦ обеспечивает хорошо развитую карбидную зону с мелкими и равномерно распределенными частицами карбидов и, как следствие, плавным снижением твердости по толщине слоя (рис. 4). Для того чтобы сохранить насыщенность мартенсита легирующими элементами, доля частиц карбидной фазы при ВЦ является оптимальной (17...20 %). Этому значению соответствует концентрация углерода на рабочей поверхности в 1,3...1,5 % и твердость 61...62 HRC. Протяженность карбидной зоны составляет 0,4 мм и более, чтобы превышать на ~0,2 мм толщину припуска, удаляемого при зубошлифовании. Режимы с увеличенным временем диффузионной стадии, отношением стадий  $\Sigma\tau_a:\Sigma\tau_n$ , равным 0,3...0,4 обеспечивают необходимую технологическую наследственность и высокую контактную выносливость (см. табл. 1).

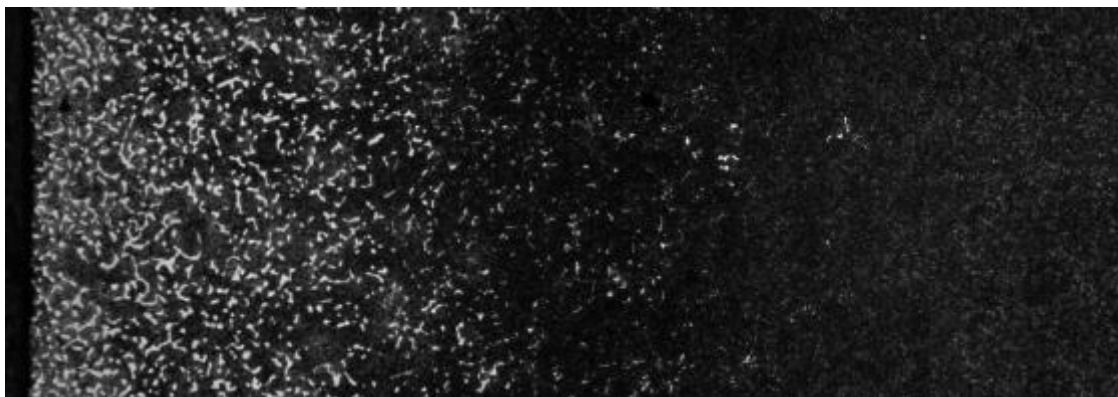


Рис. 4. Микроструктура приповерхностного слоя образцов, насыщенных при отношении продолжительности стадий цикла  $\Sigma\tau_a: \Sigma\tau_n = 0,3$  (x400)

Влияние параметров карбидной фазы на износостойкость цементованной поверхности характеризуют результаты испытаний образцов (рис. 5). Машина “Шкода-Савин” создает жесткие условия изнашивания - процесс микрорезания микронеровностями.

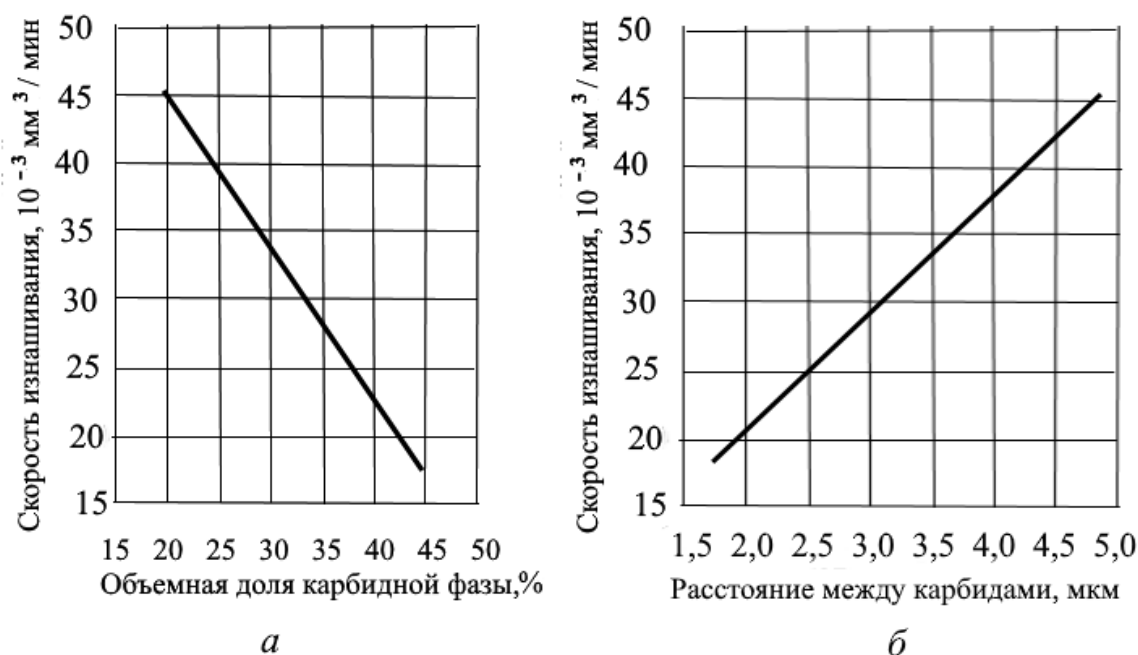


Рис. 5. Зависимость скорости изнашивания от объемной доли  $V_k$  карбидной фазы (а) и расстояния  $\ell$  между частицами карбидов (б)

Анализ полученных результатов подтверждает вывод о том, что уменьшение расстояния между карбидами при одновременном увеличении объемной доли карбидной фазы повышают сопротивление изнашиванию. Установлено, что увеличение объемной доли карбидной фазы на поверхности с 20 до 46 % об. и уменьшения расстояния между частицами карбидами с 4,2 до 1,5 мкм сопровождается в условиях микрорезания снижением скорости изнашивания в 2,5 раза.

Таким образом, для максимального повышения работоспособности шлифованных зубчатых колес, при разработке рациональной технологии поверхностной обработки, необходимо



учитывать технологическую наследственность, создаваемую ХТО. В производственных условиях последнюю принято оценивать твердостью поверхности. Как видно из табл. 1, после всех видов цементации твердость поверхности достаточно высокая и меняется от 60 до 64 HRC.

Применение рациональной технологии поверхностной обработки, учитывающей технологическую наследственность цементации (газовой, ионной и вакуумной), повышает эксплуатационные свойства рабочих поверхностей зубьев колес до 2,3 раза.

**Выводы.** Контактная выносливость и износостойкость шестерен зависят от технологической наследственности цементации, которая проявляется через насыщенность цементованного слоя углеродом, объемную долю карбидной фазы, пластичность мартенсита, а также наличие остаточного аустенита. Способ цементации (газовая, ионная или вакуумная) оказывает значительное влияние на свойства. Управление протяженностью и строением карбидной зоны цементованного слоя достигается изменением времени активных стадий насыщения.

Определено оптимальное соотношение длительностей стадий ГЦ (60 и 40 %), при котором контактная выносливость образцов в 1,5 раза выше, чем при одностадийном процессе насыщения.

Предпочтительными являются способы насыщения в тлеющем разряде (ионная цементация и нитроцементация), отличающиеся кроме ускорения цикла термического упрочнения более равномерным распределением карбидов в слое, возможностью управления процессом насыщения и стабильностью результатов.

ВЦ является перспективным способом обработки и обеспечивает высокие эксплуатационные свойства. Технологические возможности при ВЦ могут быть реализованы при достаточно простой схеме проведения процесса – поддержании всех технологических факторов постоянными, кроме циклического изменения расхода ацетилена.

### Список литературы

1. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И.П. и др. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей. – М.: Высшая школа, 2001. – 493 с.
2. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
3. Алексеев В.И., Ананьев В.М., Булыгина М.М. и др. Авиационные зубчатые передачи и редукторы. М.: Машиностроение, 1981г. 374 с.
4. Рыжов Н.М., Фахуртдинов Р.С., Горбалетов Н.В. Управление химическим составом, структурой и свойствами зубчатых колес при ХТО // Вестник машиностроения. - 1985. - № 9. - С. 16-20.
5. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е., Фахуртдинов Р.С. Управление насыщенностью углеродом диффузионного слоя при вакуумной цементации теплостойких сталей // МиТОМ, 2004.- № 8. - С. 22-27.
6. Kula P., Olejnik J., Kowalewski J. New vacuum carburizing technology //Heat treatment progress, V. 1, No. 1, 2001. - P. 57–65.
7. Переверзев В.М., Колмыков В.И., Воротников В.А. Влияние карбидов на стойкость цементованных сталей к изнашиванию в кварцевом абразиве // МиТОМ. - 1990. - № 4. - С. 45-47.

8. Виноградов В.Н., Сорокин Г. М., Колокольников М. Г. Абразивное изнашивание. - М.: Машиностроение, 1990. - 224 с.
9. Рыжов Н.М., Смирнов А.Е. Инновационные технологии химико-термической обработки для упрочнения зубчатых колес газотурбинных двигателей /Научные труды Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы и современные технологии в машиностроении» - М.: Машиностроение, 2010. – С. 15-22.
10. Пахомова С.А. Эффективность деформационного упрочнения теплостойких сталей // Деформация и разрушение металлов. - 2007. - № 1. - С. 17-20.
11. Войнов Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия. - М.: Машиностроение, 1980. - 120 с
12. Методы анализа поверхностей: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 582 с.

*Дата поступления статьи: 15 сентября 2016 года.*