

УДК 621.78:621.785.52.015

В.И. Астащенко, д-р техн. наук, **А.И. Швеёв**, канд. техн. наук, доцент,
Т.В. Швеёва, канд. техн. наук, **И.М. Родькин**, **И.А. Швеёв**
Набережночелнинский институт, филиал ФГАОУ ВПО
«Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия
Тел.: 8 (8552) 58-95-38; E-mail: astvi-52@mail.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЦЕМЕНТОВАННЫХ ЗУБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ ПО УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИМ КРИТЕРИЯМ

Рассмотрены существующие показатели оценки качества металла цементованных зубчатых деталей и предложены более эффективные критерии. Показана роль трооститной полосы, эффективной глубины упрочненного слоя, структуры и микротвердости сердцевины на долговечность цементованных деталей в эксплуатации. Установлена связь между разностью значений микротвердости отдельных структурных составляющих с долговечностью шестерен при стендовых и эксплуатационных испытаниях.

Рекомендовано применять усовершенствованные критерии для оценки свойств приповерхностного и упрочненного цементованного слоя, а также структуры сердцевины детали с контролем микротвердости отдельных составляющих.

Ключевые слова: сталь, зубчатые детали, цементация, критерии качества металла, долговечность, микротвердость, инженерия поверхности.

Введение

Постоянно повышающиеся требования к деталям машин по обеспечению высокой надежности и долговечности, хорошей обрабатываемости, экономии топливно-энергетических ресурсов, улучшению условий труда на производстве и многие другие причины свидетельствуют о «нестареющей» актуальности работ по технологии металлов и сплавов.

Безотказность и долговечность большинства машин и механизмов в значительной степени зависят от работоспособности зубчатых деталей. В процессе работы зубья детали испытывают как статические, так и динамические нагрузки, изменяющиеся по симметричному и асимметричному знакопеременному циклу. К рабочим поверхностям зубьев предъявляются высокие требования по контактной прочности и износостойкости, которые обеспечиваются упрочняющими методами обработки, и несомненное преимущество здесь занимают способы химико-термической обработки. Однако, как показывают статистические данные, ресурс цементованных и нитроцементованных зубчатых деталей, изготовленных и упрочненных в одинаковых условиях производства и из одной марки стали, имеют разброс по долговечности от 10 и более раз. В подавляющем числе случаев лимитирует стойкость таких деталей не износ и питтинг поверхности зубьев, а их поломка.

В результате изгибающей нагрузки при передаче крутящего момента и при торможении может происходить разрушение в ножке зуба – по галтели. При циклических нагрузках происходит усталостное разрушение в основании зуба – наиболее опасном его сечении. Поэтому ответственность за надежность и работоспособность зубчатой передачи в полной мере возлагается на сечение зуба в основании и зону перехода от его эвольвенты к впадине. Таким образом, вопросы, посвященные повышению и стабилизации на

высоком уровне изгибной и усталостно-изгибной прочности зубьев, являются актуальными и первоочередными на пути создания конкурентоспособной и высококачественной автотехники. Решение этой проблемы неразрывно связано с совершенствованием существующих и изысканием новых, более эффективных, методов контроля качества упрочненных деталей для получения более достоверной информации об их работоспособности в эксплуатации.

Цель работы - выявление основополагающих критериев качества металла упрочненной поверхности и сердцевины, ответственных за надежность и долговечность в эксплуатации цементованных изделий. При решении поставленной цели базировались на комплексных исследованиях зубчатых деталей после стендовых и эксплуатационных испытаний.

Основное содержание и результаты работы

Исследования проводились на цементованных шестернях главных передач ведущих мостов, двигателя и коробки передач автомобиля «КАМАЗ». Химико-термическая обработка деталей осуществлялась в проходных безмуфельных агрегатах ф. «Холкрофт» и «Irsen». Детали изготавливались из сталей 20ХГНМТА и 18ХГР, состав и свойства которых соответствовали требованиям ТУ 14-1-5509-2005 и ТУ 14-1-5561-2008 соответственно (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Химический состав сталей

Марка стали	Содержание химических элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Ti (B)	Al	S	P
20ХГНМТА	0,18-0,23	0,17-0,37	0,80-1,10	0,80-1,10	0,80-1,10	0,20-0,30	0,03-0,09	-	≤ 0,025	≤ 0,025
18ХГР*	0,14-0,20	0,15-0,40	1,10-1,35	1,1-1,35	0,15-0,30	0,04-0,12	(0,001-0,003)	0,02-0,05	0,020-0,035	≤ 0,025

Примечание: * Суммарное содержание Mn, Cr, Ni и Mo от 2,5 до 3,05%.

Таблица 2

Прокаливаемость стали

Сталь	Твердость (HRC) на расстоянии от закаленного торца, мм						
	5	9	10	15	25	40	50
20ХГНМТА	-	30-40	-	24-38	-	≤ 25	-
18ХГР	37-43	-	33-39	-	25-31	-	≥ 22

Для металлографических исследований использовали оптические микроскопы «Неофот - 21» и «Эпитип - 2» (Германия) и IM – 7200 (Япония) с системой изображения «ВидеоТест-М» и программным продуктом «Trixomet-PRO»: оценивали размер зерна, степень загрязненности неметаллическими включениями, размер игл мартенсита и количество остаточного аустенита.

Химический состав сталей определяли по ГОСТ 18895-97 на спектрографе АФС-51 со специализированным программным обеспечением SBP и Next, эмиссионном спектрометре «Spektrolab» и анализаторах АН-7529 и АН-7560 на углерод и серу соответственно. Твердость поверхности и сердцевины цементованных деталей после термической об-

работки определены по ГОСТ 9013-59 на приборах ТР-5006 и ТК-2М. Микротвердость по глубине цементованного слоя и отдельных структурных составляющих определяли в соответствии с ГОСТ 2999-75 на приборе «Дюримет» при нагрузке на индентор 0,1Н и 0,05Н (100гс и 50гс соответственно). При контроле зубчатых деталей в качестве сердцевины принимали зону, расположенную по осевой линии зуба на расстоянии 2/3 от его высоты. За эффективную глубину цементованного слоя принимали расстояние от поверхности до зоны с микротвердостью HV550. Балл мартенсита определяли по ГОСТ 8233-56, а остаточного аустенита и карбидов – по СТП 37.104.1381-2001 с использованием известных рекомендаций и опыта предприятий автопрома [1]. Для макро- и микро-травления использовали широко применяемые реактивы – горячий 50%-ный раствор серной кислоты и 4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте соответственно. Просмотр слаботравленных шлифов для определения трооститной полосы или сетки проводился при увеличении 400* после травления в 0,4%-ом растворе азотной кислоты в этиловом спирте в течение 15-20 секунд. Прокаливаемость стали определяли методом торцевой закалки стандартных образцов по ГОСТ 5657-69.

Стендовые испытания зубчатых деталей проводили в составе мостов, коробки передач и отдельных узлов и агрегатов. Изгибная циклическая долговечность шестерен оценивалась по результатам испытаний главных передач на стенде «Gleason-510» в соответствии с программой ПМ 37.104.17.1027-99 под крутящий момент двигателя, равный 638 Н·м (65кгс·м).

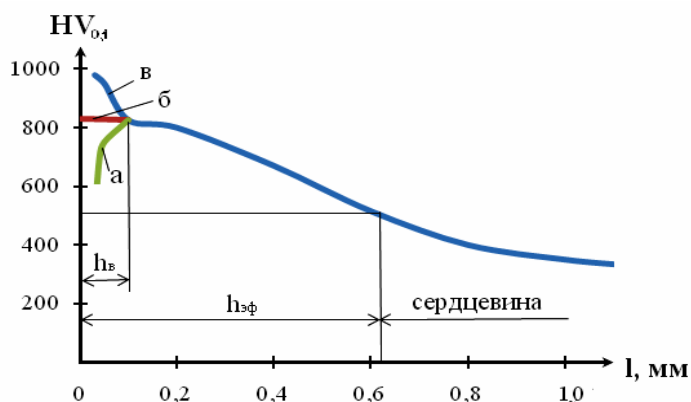


Рис. 1. Изменение микротвердости по глубине упрочненного слоя:

- а – присутствие трооститной полосы;
- б – отсутствие трооститной полосы;
- в – после дробеструйной обработки;
- h_t – толщина трооститной полосы, мм
- $h_{эф}$ – глубина эффективного слоя, мм

Но наиболее объективно о долговечности зубчатых деталей предоставляет величина отношения фактической микротвердости поверхности к теоретической (микротвердость поверхности без трооститной полосы составляет ~ 850 HV). Такой показатель (КНВ) учитывает изменение свойств приповерхностного слоя в достаточно широких пределах – от присутствия в нем немартенситных продуктов превращения до наличия эффекта дробенаклепа. Высокая долговечность цементованных шестерен достигается если этот показатель ($КНВ = HV_{факт.} / HV_{теорет.}$) будет $\geq 1,0$ (табл.3).

Таблица 3
Долговечность деталей с различной микротвердостью поверхности

Микротвердость, HV	Показатель, $HV_{\text{факт.}} / HV_{\text{теорет.}}$	Пробег, км. (Стойкость, час.)
657	0,773	14734
878	1,033	62038
874	1,028	(2ч 45 мин)
965	1,114	(4ч 05 мин)

Прогнозирование качества деталей по рассмотренному показателю необходимо проводить в сочетании с толщиной трооститной полосы (сетки) на поверхности цементованных изделий. В зависимости от данной толщины изменяется не только твердость поверхности (рис. 2), но и изменяется и величина и вид напряженного состояния. Несмотря на неоспоримую связь долговечности цементованных шестерен с эффективной глубиной упрочненного слоя (рис. 3), присутствие трооститной полосы на поверхности оказывает существенное влияние на стойкость деталей в эксплуатации. Так, предел выносливости зубьев уменьшается в 1,4 раза при увеличении толщины трооститной полосы с 0 до 0,03 мм и уменьшается в 3 раза, если трооститная полоса составляет 0,1 мм [1]. Статистический анализ стойкости деталей и последующие металлографические исследования позволили установить вклад трооститной полосы в долговечность шестерен. Эти сведения показали, что при определении эффективной толщины упрочненного слоя необходимо учитывать толщину трооститной полосы следующим образом:

$$\tau_{\text{эф}} = \tau_{\text{эф}}^{\text{общ}} - 7,6 \cdot \tau_{\text{тр}}, \text{ где}$$

$\tau_{\text{эф}}^{\text{общ}}$ – общая эффективная толщина слоя (с учетом трооститной полосы), мм;

$\tau_{\text{тр}}$ – толщина трооститной полосы, мкм.

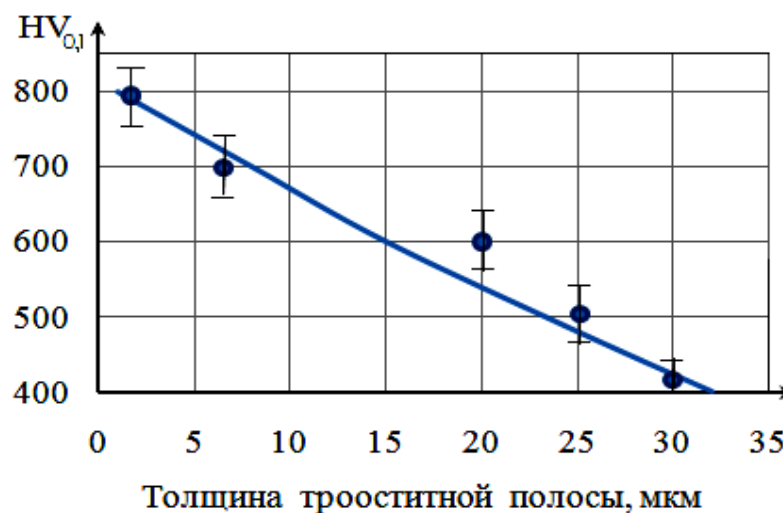


Рис. 2. Изменение микротвердости ($HV_{0,05}$) поверхности цементованной детали от толщины трооститной полосы.

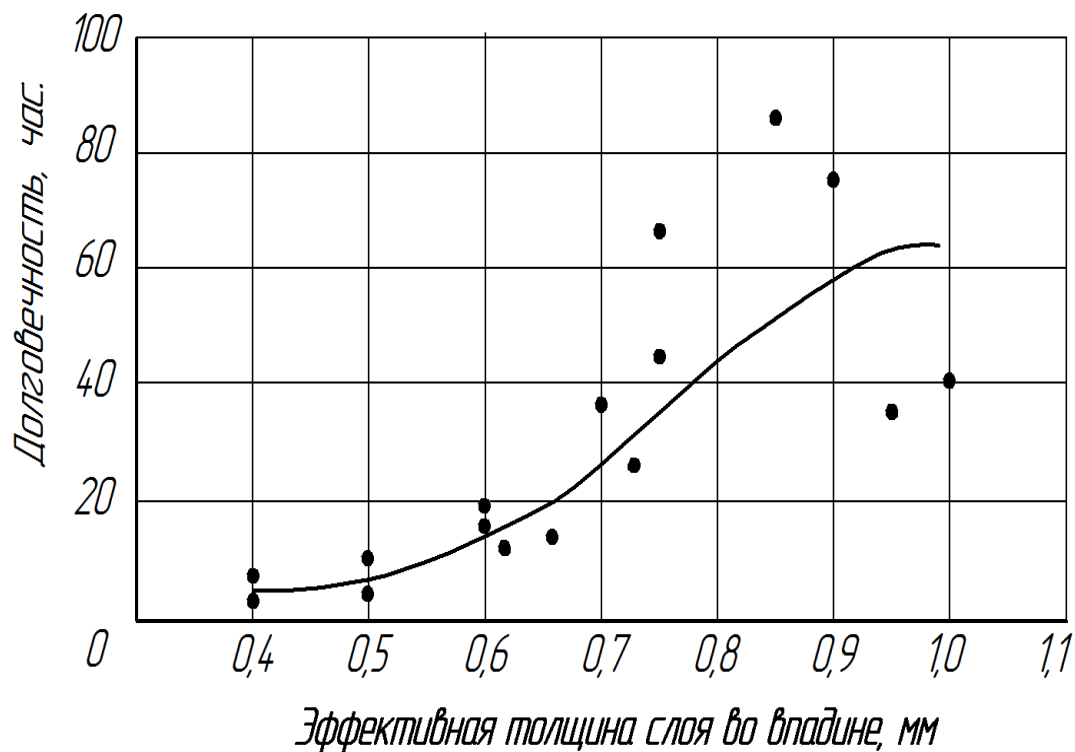


Рис. 3. Залежність довговечності при изгибных испытаниях от эффективной толщины упрочненного слоя ($HV_{0,1550}$) во впадине зубьев.

О качестве упрочненного слоя на цементованных деталях предлагается судить по коэффициенту, учитывающему присутствие трооститной полосы на поверхности, определяемого следующим образом:

Максимальная долговечность деталей приходится на значение показателя равного 1,0, т.е. у изделий, на поверхности которых трооститная полоса отсутствует.

Работоспособность зубчатых деталей во многом определяется свойствами материала сердцевинки изделия [1-5]. Основное влияние на эти свойства оказывает металлургический фактор – прокаливаемость стали, формируемая в процессе выплавки, раскисления, легирования и кристаллизации. Базируясь на литературных источниках и используя опыт предприятий автомобильной промышленности, рекомендуемая твердость сердцевинки зуба деталей находится в довольно широких пределах – от 29HRC до 45HRC. Это является одной из причин высокой дисперсии эксплуатационного ресурса цементованных деталей (рис. 4, табл.4).

Следует отметить, что во многих случаях не учитывается такой важный параметр, как однородность структуры. Степень однородности микростроения сердцевинки целесообразно оценивать по микротвердости присутствующих структурных составляющих, а точнее по разности их микротвердости. В подтверждение сказанному свидетельствуют зависимости долговечности деталей полученные при стендовых и эксплуатационных испытаниях от степени однородности структуры в сердцевине зуба (рис. 5 и рис. 6). Видно, что с уменьшением разности в значениях микротвердости структурных составляющих в сердцевине зуба шестерен долговечность деталей повышается.

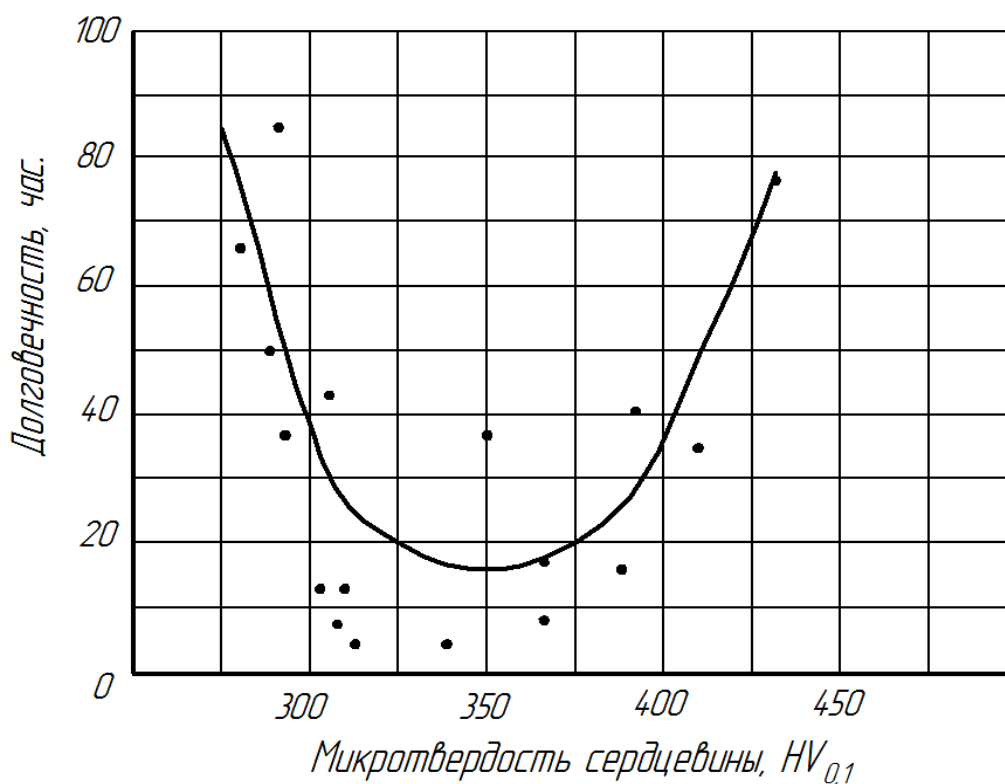


Рис. 4. Зависимость изгибной долговечности от среднего значения микротвердости в сердцевине зуба шестерен.

Таблица 4

Влияние твердости сердцевины зуба шестерни на стойкость при стендовых испытаниях (сталь 20ХГНМТА)

Прокаливаемость, $\Pi \frac{HRC}{9}$	Твердость, HRC		Глубина* цементованного слоя, мм	Стойкость детали, час.
	поверхности	сердцевина		
43,5	61,5	44,0	1,20	2,55
39,0	61,5-62,0	36,0	1,15	4,10

* Глубина определена во впадине

При достаточно высокой степени однородности микроструктуры (разность микротвердости структурных составляющих не более 20HV) достигается максимальная долговечность деталей. Такой результат может достигаться при наличии в сердцевине детали низкоуглеродистых структур – мартенсита, троостомартенсита, троостита и троостосорбита.

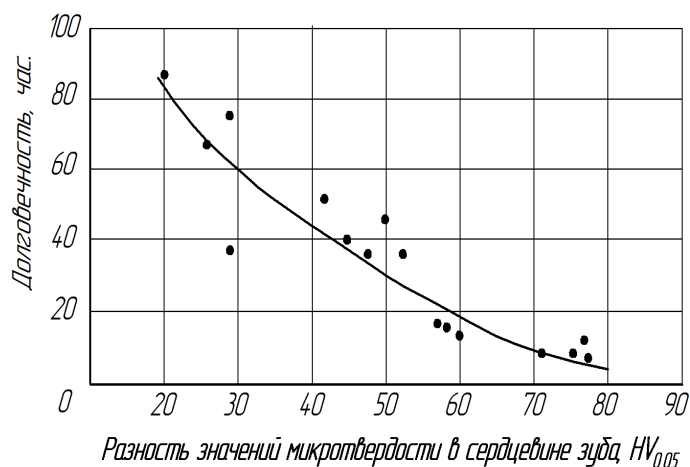


Рис. 5. Зависимость долговечности шестерен при изгибных стендовых испытаниях от разности значений микротвердости в сердцевине зуба детали.

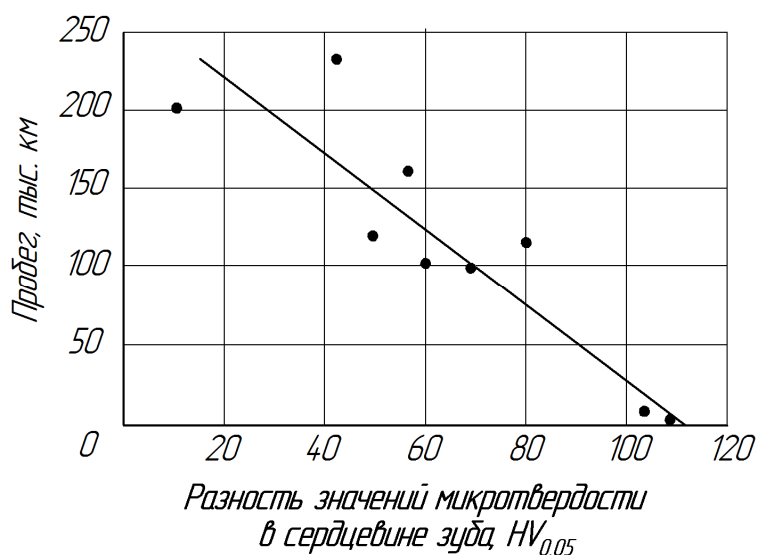


Рис. 6. Зависимость долговечности шестерен при эксплуатации автомобиля в зависимости от разности значений микротвердости в сердцевине зуба детали.

Присутствие отдельных зерен феррита и сорбита, а также других структурных составляющих резко отличающихся по свойствам ($\Delta HV > 80$ ед.) служит причиной низкой стойкости, а зачастую, и преждевременного выхода из строя деталей в эксплуатации. Основываясь на этих данных, рекомендуется применять новый критерий для определения качества цементованных зубчатых деталей, согласно которому оценивать свойства сердцевины зуба по зависимости:

, где $\Delta HV_{\text{серд}}$ - разность значений микротвердости структурных составляющих в сердцевине зуба детали;

$HV_{\text{серд}}^{\text{ср}}$ - среднее значение микротвердости сердцевины зуба детали.

Видно, что максимальное значение коэффициента приходится на случаи, при которых разность значений микротвердости между отдельными структурными составляю-

щими в сердцевине приобретает минимальное значение, т.е. когда наблюдается более однородное структурное состояние.

До настоящего времени открытым остается вопрос о комплексном вкладе структурно-фазового состояния упрочненного слоя в показатель долговечности зубчатых деталей. Об этом свидетельствует неоднозначное влияние на контактную, изгибную и усталостную прочность остаточного аустенита (рис. 7), вида и содержания карбидов, балльности мартенсита и распределение углерода по толщине упрочненного цементованного слоя. В этой связи необходима разработка интегрированного критерия, способного охватить не только долевое участие отдельно взятых структурно-фазовых особенностей в цементованном слое, но и учесть вид и распределение напряженного состояния по его толщине.

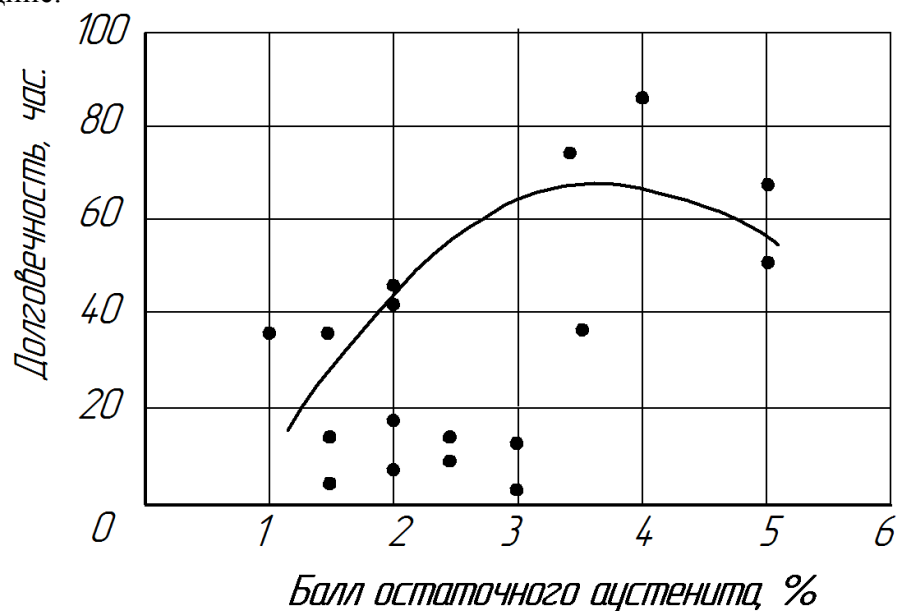


Рис. 7. Влияние остаточного аустенита на долговечность шестерен при усталостно-изгибных стендовых испытаниях.

Такую задачу, на наш взгляд, может решить метод определения деформируемости малопластичных материалов [6], который позволяет оценить работоспособность цементованного слоя на деталях, а соответственно и спрогнозировать конструкторную прочность и долговечность стальных цементованных изделий.

Заключение

1. Предложены новые критерии оценки качества металла цементованных зубчатых деталей, базирующиеся на результатах металлографических исследований шестерен после стендовых и эксплуатационных испытаний.
2. В развитие теории об инженерии поверхности деталей машин показано изменение физико-механических свойств приповерхностного цементованного слоя и его роль в формировании работоспособности и надежности в эксплуатации металлоизделий.
3. При определении глубины эффективного упрочненного цементованного слоя она должна быть уменьшена на величину семикратной толщины трооститной полосы, учитывая вредное влияние этого поверхностного дефекта на долговечность зубчатых деталей.

4. Установлена связь между микротвердостью в сердцевине зуба детали и усталостно-изгибной прочностью. Высокая долговечность шестерен достигается при наличии однородного состояния в сердцевине, характеризуемого равнозначными показателями микротвердости отдельных структурных составляющих. Присутствие двух и более структурных составляющих с различной микротвердостью снижает долговечность деталей и, в тем большей степени, чем выше разница значений микротвердости между этими составляющими.

Список литературы:

1. Контроль качества термической обработки полуфабрикатов и деталей: справочник / под общ. ред. В.Д. Кальнера. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
2. Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. / В.М. Зинченко. – М.: изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303с.
3. Козловский И.С. Критерии оценки качества и основы рационального выбора цементуемых и нитроцементуемых сталей. / И.С. Козловский, В.А. Оловянишников, В.М. Зинченко // МиТОМ, 1981, №3, с. 2-9.
4. Астащенко Т.В. Оценка состояния металла зубчатых колес после химико-термической обработки. / Т.В. Астащенко, Р.Р. Калимуллин, А.И. Швейов, И.М. Родькин // Автомобильная промышленность, 2010, №6, с. 33-36.
5. Архипов И.Я. Изгибная выносливость зубьев цементованных колес с различной твердостью материала сердцевины. / И.Я.Архипов, М.С.Полоцкий // Вестник машиностроения, 1972, №10, с. 30-31.
6. Глинер Р.Е. Определение предельной деформируемости цементованной стали. / Р.Е. Глинер // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2006, №12, с. 51-53.

Надійшла до редколегії 02.12.2014.

V.I. Astashchenko, A.I. Shveyov, T.V. Shveyova, I.M. Rodkin, I.A. Shveyov

FORECASTING OF DURABILITY OF THE CEMENTED GEAR DETAILS BY ADVANCED METALGRAPHIC CRITERIA

Existing indicators of quality rating of metal of the cemented cogged details are considered and more effective criteria are offered. The role of a troostitny strip, effective depth of the strengthened layer, structure and core microhardness on durability of the cemented details in operation is shown. Connection between a difference of values of microhardness of separate structural components is established with durability of pinion gears at stand and operational trials.

It is recommended to apply advanced criteria to an assessment of properties of the near-surface and strengthened cemented layer, and also structure of a core of a detail with control of microhardness of separate components.

Keywords: steel, cogged details, cementation, performance criterion of metal, durability, microhardness, surface engineering.