УДК 669.15

С.П. РУДЕНКО, канд. техн. наук ведущий научный сотрудник¹ E-mail: sprud.47@mail.ru

А.Л. ВАЛЬКО старший научный сотрудник¹ E-mail: valcoalex@gmail.com

С.Г. САНДОМИРСКИЙ, д-р техн. наук

заведующий лабораторией металлургии в машиностроении¹ E-mail: sand_work@mail.ru

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 02.10.2019.

ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭКОНОМНО-ЛЕГИРОВАННЫХ МАРОК СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС МОБИЛЬНЫХ МАШИН

Приведены примеры основных типов разрушений высоконагруженных зубчатых колес трансмиссий автомобильной и автотракторной техники. Проанализированы вызывающие их причины. Установлено, что критерием работоспособности высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий, подвергаемых упрочняющей ХТО, является глубинная контактная усталость активных поверхностей зубьев. Показано, что для повышения сопротивления контактной усталости зубчатых колес трансмиссий мобильных машин важно обеспечение высокой микротвердости в зоне действия максимальных глубинных контактных напряжений. Сопоставлены результаты применения традиционной и экономно-легированных сталей для высоконагруженных зубчатых колес трансмиссий. Показаны преимущества использования экономно-легированных сталей. Установлено, что склонность к деформации традиционной высоколегированной стали при термической обработке в 2–4 раза выше, чем экономно-легированных сталей. Ресурс зубчатых колес из экономно-легированных сталей повышается не менее чем в 2 раза. Эти стали рекомендованы для изготовления высоконапряженных зубчатых колес.

Ключевые слова: зубчатые колеса трансмиссий, экономно-легированные стали, химико-термическая обработка, цементованные слои, механические характеристики, деформация, разрушение, ресурс

Высоконапряженные зубчатые колеса трансмиссий энергонасыщенных мобильных машин определяют ресурс работы всего транспортного средства. Правильный выбор материала и методов его термообработки — главная задача, решение которой обеспечит требуемые эксплуатационные свойства зубчатых колес трансмиссий. Оптимальное сочетание материала и технологии его обработки позволит получать гарантированно надежные и сравнительно недорогие зубчатые колеса, предназначенные для работы в условиях высоких напряжений. Перспективным является использование для их изготовления экономно-легированных сталей [1, 2].

Для выбора материала высоконапряженных зубчатых колес и методов его термообработки необходимо знать условия эксплуатации деталей и критерии их работоспособности, установить требования к стали, определяющие долговечную эксплуатацию изделий при одновременном обеспечении ее экономичности и технологичности. Для определения основного предельного состояния, регламентирующего работоспособность зубчатых колес, условий правильного выбора материала и упрочняющей обработки, необходим анализ типовых разрушений шестерен в условиях эксплуатации. Проведение этого анализа — цель первой части статьи.

Проведенные в [3, 4] исследования показали, что изгибные поломки зубьев в опасном сечении галтели могут происходить как при небольшом числе циклов нагружения, так и в результате усталостного разрушения. Поломки зубчатых колес, вызванные недостаточной изгибной прочностью зубьев, обусловлены повышенной концентрацией напряжений (рисунок 1 *a*), большими динамическими нагрузками или остаточными растягивающими напряжениями. Усталостные разрушения (см. рисунок 1 *b*) характерны для зубчатых колес со шлифованными по всему профилю зубьями, испытывающими знакопеременный цикл нагружения в условиях эксплуатации.

Типичным разрушением является и контактное выкрашивание активных поверхностей зубьев, которое характеризуется двумя видами усталостного



a



b

Рисунок 1 — Изгибная (a) и усталостная (b) поломка зуба ведомого зубчатого колеса редуктора Figure 1 — Bending (a) and fatigue (b) tooth breakage of driven gear of the gearbox

разрушения поверхностных слоев: питтингом и отслаиванием (рисунок 2) [3–6].

Развитию питтинга способствует постепенное накопление пластической деформации в поверхностных слоях, вызывающей увеличение удельного объема в них и возникновение больших остаточных напряжений сжатия. При многократной повторной нагрузке в поверхностных слоях зубьев в плоскостях, расположенных под углом 30° к поверхности, вследствие локализации микропластической деформации возникают микротрещины, которые и вызывают разрушение слоев при участии расклинивающего действия смазки. Такой вид выкрашивания в большинстве случаев к потере работоспособности зубчатых колес трансмиссий не приводит.

Напряженное состояние контактирующих поверхностей сопряженных зубьев характеризуется



Рисунок 2 — Контактное повреждение поверхности зубчатого колеса редуктора мотор-колеса автосамосвала Komatsu: 1 — питтинг; 2 — глубинное выкрашивание (отслаивание) Figure 2 — Contact damage to the surface of gear motor-wheels of the Komatsu dump truck: 1 — pitting; 2 — deep chipping (peeling)

и глубинными эквивалентными напряжениями. Именно они при определенных условиях вызывают прогрессирующее выкрашивание поверхностей зубьев — отслаивание, т. е. большое по глубине и площади выкрашивание, которое, зародившись в зоне полюса зацепления, имеет тенденцию распространяться по боковой поверхности зуба в зоне однопарного зацепления. Трещина глубинного контактного выкрашивания зарождается и развивается на разной глубине упрочненного слоя в зависимости от размера зубчатого колеса, передаваемой нагрузки и характера распределения твердости в диффузион-



Рисунок 3 — Трещина глубинного выкрашивания поверхности зуба зубчатого колеса: a — модуль m = 4,5 мм; b — модуль m = 6,5 мм Figure 3 — Crack of deep chipping of the tooth surface of gears: a — module m = 4.5 mm; b — module m = 6.5 mm



Рисунок 4 — Вид поверхности трещины глубинного выкрашивания Figure 4 — Surface view of a deep chipping crack

ном слое (рисунок 3). Наличие притертой зоны зарождения и распространения глубинной трещины указывает на усталостный механизм ее возникновения (рисунок 4).

На основании многочисленных экспериментальных данных установлено, что критерием работоспособности высоконапряженных зубчатых колес трансмиссий, подвергаемых упрочняющей XTO, является именно этот вид разрушения поверхностей зубьев [5, 6].

Глубинные разрушения поверхностно упрочненных зубчатых колес обусловлены особенностями изменения напряженного состояния и неоднородностью механических свойств материала по толщине диффузионного слоя в зоне контакта зубьев. Причем глубина расположения и действующие напряжения зависят не только от радиуса кривизны профиля зуба, величины поверхностных контактных напряжений, но и от характера распределения микротвердости по глубине упрочненного слоя и его микроструктуры. Исследования причин разрушений высоконапряженных зубчатых колес автотракторной техники после эксплуатации и стендовых испытаний показали [4–6], что наибольшее сопротивление глубинной контактной усталости достигается при микротвердости в опасной зоне не менее 750–770 $HV_{0,2}$ и бездефектной мартенситно-аустенитной структуре. Зубчатые колеса высокого качества должны иметь эффективную толщину слоя до зон с микротвердостью HV 750, равную (0,08–0,1)*m*, HV 700 — (0,12–0,15)*m* и HV 600 в пределах (0,2–0,25)*m* (ГОСТ 30634–99). У зубчатых колес с меньшей эффективной толщиной преждевременно развивается глубинное контактное выкрашивание (рисунок 5).

Для зубчатых колес с большей эффективной толщиной диффузионного слоя характерны сколы головок зубьев (рисунок 6).

К существенному понижению сопротивления усталости высоконапряженных зубчатых колес приводят структурные дефекты диффузионного слоя [4–6]. Наличие избыточных мелкодисперсных карбидов в зоне действия максимальных касательных напряжений приводит к преждевременному глубинному контактному выкрашиванию и сколам зубьев (рисунок 7).

В структуре упрочненного слоя, идентифицируемой после общепринятого травления как мелкоигольчатый мартенсит с 20–45 % остаточного



Рисунок 5 — Глубинное контактное повреждение поверхностей зубьев с недостаточной эффективной толщиной диффузионного слоя Figure 5 — Deep contact damage to the tooth surfaces with insufficient effective thickness of diffusion layer



Рисунок 6 — Глубинное контактное выкрашивание и сколы головок зубьев с увеличенной эффективной толщиной диффузионного слоя Figure 6 — Deep contact chipping and spalling of tooth heads with increased effective thickness of diffusion layer



Рисунок 7 — Глубинное контактное выкрашивание поверхностей зубьев при наличии мелкодисперсных карбидов в диффузионном слое Figure 7 — Deep contact chipping of tooth surfaces in the presence of finely dispersed carbides in the diffusion layer





Рисунок 8 — Глубинное контактное выкрашивание и сколы зубьев при наличии бейнита в диффузионном слое Figure 8 — Deep contact chipping and teeth spalling in the presence of bainite in the diffusion layer

b

аустенита, в ряде случаев присутствует бейнитная фаза, которая в количестве 10-20 % приводит к преждевременному глубинному контактному выкрашиванию и выходу из строя высоконапряженных зубчатых колес даже при высокой твердости их цементованного слоя [4–6] (рисунок 8).

а

Таким образом, для обеспечения сопротивления контактной усталости зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных мобильных машин особое значение приобретают твердость (микротвердость) и качество структуры диффузионных слоев на определенном расстоянии от поверхности зубьев в зоне действия максимальных глубинных контактных напряжений.

Регламентирование указанных показателей является гарантией обеспечения высокого уровня сопротивления материала усталостному разрушению. Поэтому определяющими показателями при выборе экономно-легированных марок стали являются их способность к науглероживанию и восприимчивость к закалке, т. е. прокаливаемость и закаливаемость цементованного слоя и сердцевины, обеспечивающие регламентированные распределения твердости по упрочненному слою и механические характеристики сердцевины [2, 7].

Широко применяемые высоколегированные никельсодержащие марки конструкционных сталей обладают комплексом высоких механических свойств, но требуют специальных режимов термической и химико-термической обработки. Непосредственная закалка высоколегированных сталей неприемлема из-за образования остаточного аустенита в структуре слоя, понижающего поверхностную твердость. Например, для сталей типа 20Х2Н4А необходима операция высокого отпуска после цементации, позволяющая уменьшить количество остаточного аустенита в цементованном слое. При стабильной работе печного оборудования, оснащенного системами автоматического регулирования параметров техпроцесса, максимальная поверхностная твердость образцов из стали 20X2H4A достигает 60–61 HRC [8].

Применение экономно-легированных наследственно-мелкозернистых сталей с невысоким содержанием никеля и других легирующих элементов позволяет использовать режим непосредственной закалки или закалки с подстуживанием после цементации. Это снижает деформацию шестерен и затраты на их обработку. Установлено, что экономно-легированные стали могут быть успешно применены для крупномодульных зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин только при условии обеспечения требуемой полосы прокаливаемости и регламентированного распределения механических свойств материала по толщине упрочненного слоя [1].

Рассмотрим особенности применения для высоконапряженных зубчатых колес экономно-легированных сталей: 21ХГНМА-В (ТУ 14-550-51-2015) и 21ХГНМБА (патент № 031975 ЕПВ) [9] в сопоставлении с высоколегированной хромоникелевой сталью 20Х2Н4А (ГОСТ 4543-2016), содержащей никель свыше 3 %. Химический состав экономно-легированных сталей приведен в таблице 1. Из указанных марок сталей были изготовлены образцы для исследования механических свойств, торцовые образцы для исследований прокаливаемости сердцевины и цементованных слоев, образцы-свидетели (Ø 90 × 35) для исследований механических и структурных характеристик после XTO по разным схемам и зубчатые колеса (m = 10 мм) для проведения сравнительных ресурсных испытаний.

Механические свойства исследованных марок сталей приведены в таблице 2. Показано, что временное сопротивление экономно-легированных сталей находится в пределах 1120–1190 Н/мм². Сталь 21ХГНМА-В имеет самую высокую величину ударной вязкости (160 Дж/см²), которая в два раза выше, чем для стали 20Х2Н4А.

Таблица 1 — Химический состав экономно-легированных сталей $21X\Gamma HMA$ -B и $21X\Gamma HMBA$ Table 1 — The chemical composition of sparingly alloyed steels 21KhGNMA-V and 21KhGNMBA

Марка стали	Массовая доля элементов, %										
	С	Si	Mn	Ni	S	Р	Cr	Мо	Nb	Cu	
21ХГНМА-В	0,22	0,35	0,88	0,52	0,005	0,008	0,54	0,46	_	0,13	
20ХГНМБА	0,23	0,28	0,94	0,70	0,004	0,010	0,64	0,24	0,076	0,09	

Марка стали	Временное сопротивление $\sigma_{_{\rm B}},$ Н/мм ²	Предел текучести	Относительное удлинение δ ₅ , %	Относительное сужение ψ, %	Ударная вязкость КСU, Дж/см ²
21ХГНМА-В	1120	95	19	54	160
21ХГНМБА	1190	1110	10	43	100
20X2H4A	1270	1080	9	45	

Таблица 2 — Механические свойства исследованных сталей Table 2 — Mechanical properties of the studied steels



1 – 20Kh2N4A; 2 – 21KhGNMBA; 3 – 21KhGNMA-V

Механические свойства стали 21ХГНМБА сопоставимы с данными для стали 20Х2Н4А, однако ударная вязкость на 20 % выше.

На рисунке 9 приведены результаты торцовой закалки трех исследованных марок сталей: 1 — 20Х2Н4А; 2 — 21ХГНМБА; 3 — 21ХГНМА-В при фактическом химическом составе. Получено, что самую высокую прокаливаемость имеет сталь 20Х2Н4А (33 HRC на расстоянии от торца 40 мм). Прокаливаемость экономно-легированных сталей 21ХГНМБА и 21ХГНМА-В — соответственно 31 и 24 HRC.

Данные результаты характеризуют механические свойства зубьев, оказывающие влияние на сопротивление усталости при изгибе, которая в большинстве случаев не является предельным состоянием зубчатых колес трансмиссий. Поэтому основной частью исследований возможности применения экономно-легированных сталей для высоконапряженных зубчатых колес является определение прокаливаемости в условиях торцовой закалки цементированных образцов.

На рисунке 10 приведены изоуглеродные диаграммы прокаливаемости цементированных торцовых образцов из исследованных марок сталей.

Из данных рисунка 10 видно, что самую высокую прокаливаемость цементированного слоя имеет сталь 21ХГНМБА, а самую низкую — сталь 20Х2Н4А. Отметим, что на рисунке 10 приведены результаты торцовой закалки без низкого отпуска. Полученные результаты показывают преимущество экономно-легированной стали 21ХГНМБА перед высоколегированной 20Х2Н4А по прокаливаемости и закаливаемости цементируемых слоев.

Для изучения влияния технологии термической обработки на механические свойства и структурные характеристики диффузионных слоев образцы из исследуемых сталей были подвергнуты XTO по разным технологическим схемам на термическом оборудовании шахтного типа с автоматическим контролем углеродного потенциала насыщающей атмосферы. Насыщение поверхностного слоя углеродом осуществляли преимущественно в пределах концентраций, исключающих выделение сажи в насыщающей атмосфере печи и карбидной фазы в поверхностных слоях деталей. Продолжительность насыщения ограничивали достижением концентрации углерода 0,35 % при толщине слоя 2,2–2,6 мм.

Схема XTO зубчатых колес из стали 20X2H4A: цементация при температуре 930 °С с последующим диффузионным выравниванием, высокий отпуск при 670 °С, закалка с температуры 830 °С, низкий отпуск при 180 °С. Получена максимальная поверхностная твердость образца 61–62 HRC. Эффективная толщина цементованного слоя до микротвердости 750 $HV_{0,2}$ составляла 0,8–1,0 мм. На расстоянии 0,2 мм от поверхности максимальное содержание остаточного аустенита равно 36 %.

ХТО сталей 21ХГНМА-В и 21ХГНМБА выполняли по разным схемам: с высоким отпуском и без высокого отпуска.

Получено (рисунок 11 *a*), что после ХТО образца из стали 21ХГНМА-В с высоким отпуском эффективная толщина до зоны слоя с микротвердостью 750 $\text{HV}_{0,2}$ составила 0,9–1,1 мм. Исключение операции высокого отпуска из процесса ХТО для стали 21ХГНМА-В положительно влияет на структурные характеристики упрочненного слоя: микротвердость цементованного слоя повысилась на 50 единиц $\text{HV}_{0,2}$, а эффективная толщина до зоны слоя с 750 $\text{HV}_{0,2}$ увеличилась до 1,5 мм (см. рисунок 11 *a*).

Микроструктура цементованного слоя образцов из стали 21ХГНМА-В после ХТО по двум схемам характеризуется дисперсностью и состоит из мелкоигольчатого мартенсита и примерно



Рисунок 10 — Изоуглеродные диаграммы прокаливаемости цементированных торцовых образцов: a -сталь 20Х2Н4А; b -сталь 21ХГНМА-В; c -сталь 21ХГНМБА Figure 10 — Isocarbon hardenability diagrams of cemented end samples: a -steel 20Kh2N4A; b -steel 21KhGNMA-V; c -steel 21KhGNMBA



Рисунок 11 — Распределение микротвердости (*a*) и остаточного аустенита (*b*) в цементованном слое стали 21ХГНМА-В после XTO с высоким отпуском (1) и без него (2) Figure 11 — Distribution of microhardness (*a*) and residual austenite (*b*) in a cemented layer of steel 21KhGNMA-V after chemical heat treatment with high tempering (1) and without it (2)

одинакового количества остаточного аустенита (см. рисунок 11 *b*), не превышающего 25 %. Размер действительного зерна в слое № 9 по ГОСТ 5639–65. Твердость сердцевины зубьев составляет 30–32 HRC.

После ХТО образцов из стали 21ХГНМБА с высоким отпуском и без него эффективная толщина до зоны слоя с микротвердостью 750 $HV_{0,2}$ одинаковая и составила 1,2 мм (рисунок 12 *a*).

Микроструктура цементованного слоя образцов из стали 21ХГНМБА после ХТО по двум схемам мелкодисперсная с размером действительного зерна в слое № 10 по ГОСТ 5639–65. Максимальное количество остаточного аустенита после ХТО без высокого отпуска (см. рисунок 12 *b*) составляет 37 %, в то время как с высоким отпуском — 23 %. Твердость сердцевины зубьев составляет 30–35 HRC.

Результаты исследований показали высокую эффективность технологических режимов ХТО эко-



Рисунок 12 — Распределение микротвердости (*a*) и остаточного аустенита (*b*) в цементованном слое стали 21ХГНМБА после XTO с высоким отпуском (1) и без него (2) Figure 12 — Distribution of microhardness (*a*) and residual austenite (*b*) in a cemented layer of steel 21KhGNMBA after chemical heat treatment with high tempering (1) and without it (2)

номно-легированных сталей, характеризующихся отсутствием операции высокого отпуска и значительным сокращением общего времени термической обработки, при обеспечении требуемых механических характеристик диффузионных слоев.

Исследования склонности к деформации сталей 20Х2Н4А, 21ХГНМА-В и 21ХГНМБА выполняли на образцах Френча. Суть метода исследования состоит в измерении изменения величины зазора между губками цементованного образца после закалки.

Получено (рисунок 13), что ширина паза образцов Френча, следовательно — и склонность к деформации, после ХТО экономно-легированной стали 21ХГНМА-В 2,5 раза, а стали 21ХГНМБА в 4 раза меньше, чем стали 20Х2Н4А. С увеличением интенсивности охлаждения деформация сталей увеличивается.

Результаты, полученные на образцах Френча, согласуются с результатами исследований точности изготовления зубчатых колес с модулем 10 мм на разных стадиях технологического передела. Так, после XTO величина накопленной погрешности шага



Рисунок 13 — Изменение ширины паза цементованных образцов Френча после закалки с разной интенсивностью: 1 — сталь 20Х2Н4А; 2 — сталь 21ХГНМА-В; 3 — сталь 21ХГНМБА Figure 13 — Changing the groove width of cemented French samples after quenching with different intensity: 1 — steel 20Kh2N4A; 2 — steel 21KhGNMA-V; 3 — steel 21KhGNMBA



Рисунок 14 — Изменение накопленной погрешности шага на разных стадиях технологического передела зубчатых колес из сталей: 1 — 20Х2Н4А; 2 — 21ХГНМА-В Figure 14 — Change in the accumulated step error at different stages of technological redistribution of gears made from steels: 1 — 20Kh2N4A; 2 — 21KhGNMA-V

зубчатых колес из сталей 21ХГНМА-В в 2,2 раза меньше, чем из стали 20Х2Н4А (рисунок 14).

Повышенная величина коробления зубчатого колеса из стали 20Х2Н4А после ХТО приводит к неравномерному съему припуска при шлифовании зубъев и преждевременному выкрашиванию отдельных зубъев с пониженными механическими характеристиками в локальных зонах диффузионных слоев. Результаты ресурсных испытаний показали [8], что при контактных напряжениях в полюсе зацепления 1700–1800 МПа долговечность зубчатого колеса из стали 20Х2Н4А составляет 400 часов до появления прогрессирующего контактного выкрашивания на рабочей поверхности отдельного зуба.

Ресурс зубчатых колес из сталей 21ХГНМА-В и 21ХГНМБА определяли по результатам прогнозирования с учетом реального распределения микротвердости по толщине диффузионного слоя [10]. Установлено, что при контактных напряжениях в полюсе зацепления 1700—1800 МПа ресурс зубчатых колес из сталей 21ХГНМА-В и 21ХГНМБА составит 900 часов.

Заключение. Проведенные исследования показали преимущество применения экономно-легированных сталей 21ХГНМА-В и 21ХГНМБА для крупномодульных зубчатых колес взамен высоколегированной. Механические свойства диффузионных слоев этих сталей удовлетворяют требованиям ГОСТ 30634—99 для зубчатых колес с m = 10 мм, что позволяет рекомендовать их для высоконагруженных зубчатых передач.

Список литературы

- Руденко, С.П. Особенности применения экономнолегированных сталей для крупномодульных зубчатых колес / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Сталь. — 2018. — № 8. — С. 54–58.
- Руденко, С.П. Оценка применимости экономно-легированных сталей для высоконапряженных зубчатых колес / С.П. Руденко, А.Л. Валько, С.Г. Сандомирский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. 2018. Вып. 7. С. 346–349.
- Колеса зубчатые. Виды повреждений. Классификация и испытание: ГОСТ 31381–2009. — Минск: БелГИСС, 2009. — 66 с.
- Сусин, А.А. Химико-термическое упрочнение высоконапряженных деталей / А.А. Сусин. — Минск: Белорус. наука, 1999. — 175 с.

- Руденко, С.П. Контактная усталость зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько. — Минск: Беларус. навука, 2014. — 126 с.
- Руденко, С.П. Сопротивление контактной усталости цементованных зубчатых колес из хромоникелевых сталей / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2017. — № 1. — С. 58–62.
- Руденко, С.П. Разработка режимов химико-термической обработки зубчатых колес из экономно легированной стали / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Механика машин, механизмов и материалов. – 2017. – № 2. – С. 34–38.
- Сопротивление контактной усталости крупномодульных зубчатых колес из хромоникелевых сталей / С.П. Руденко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2019. — № 1. — С. 58–63.
- Способ изготовления стальной детали: пат. 031975 ЕПВ / С.П. Руденко, А.Л. Валько, А.А. Шипко // заявитель и патентовладелец Объединенные институт машиностроения НАН Беларуси. — Заявл. 07.12.2015. — Опубл. 29.03.2019.
- Руденко, С.П. Особенности расчета зубчатых колес трансмиссий на глубинную контактную выносливость / С.П. Руденко, А.Л. Валько // Вестн. машиностроения. — 2015. — № 11. — С. 5–7.

RUDENKO Sergei P., Ph. D. in Eng. Leading Researcher¹ E-mail: sprud.47@mail.ru.

VALKO Aleksandr L.

Senior Researcher¹ E-mail: valcoalex5@gmail.com

SANDOMIRSKII Sergei G., D. Sc. in Eng. Head of the Laboratory of Metallurgy in Mechanical Engineering¹ E-mail: sand@iaph.bas-net.by

¹Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 02 October 2019.

APPLICATION OF PROMISING SPARINGLY ALLOYED STEELS FOR GEARS OF MOBILE MACHINES

Examples of the main types of destruction of highly loaded gears in transmissions of automotive and tractor vehicles are given. Their causes are analyzed. It is established that the criterion for the performance of highly stressed gears of transmissions subjected to hardening of chemical heat treatment is a deep contact fatigue of the active surfaces of the teeth. It is shown that to increase the resistance of contact fatigue of gears in transmissions of mobile machines, it is important to ensure high microhardness in the zone of maximum deep contact stresses. The results of the use of traditional and sparingly alloyed steels for highly loaded transmission gears are compared. The advantages of using sparingly alloyed steels are shown. It has been established that the tendency to deform of traditional high alloy steel during heat treatment is 2–4 times higher than that of sparingly alloyed steels. The lifetime of gears made of sparingly alloyed steels is increased by at least 2 times. These steels are recommended for the manufacture of highly stressed gears.

Keywords: transmission gears, sparingly alloyed steels, chemical heat treatment, cemented layers, mechanical characteristics, deformation, destruction, resource

References

- Rudenko S.P., Valko A.L. Osobennosti primeneniya ekonomnolegirovannykh staley dlya krupnomodulnykh zubchatykh koles [Features of application of sparingly alloyed steels for large-modular gears]. *Stal* [Steel], 2018, no. 8, pp. 54–58.
- Rudenko S.P., Valko A.L., Sandomirskii S.G. Otsenka primenimosti ekonomno-legirovannykh staley dlya vysokonapryazhennykh zubchatykh koles [Evaluation of application of the sparingly alloyed steels for highly stressed gear wheels]. Aktualnye voprosy mashinovedeniya [Topical issues of mechanical engineering], 2018, vol. 7, pp. 346–349.
- State Standard 31381–2009. Kolesa zubchatye. Vidy povrezhdeniy. Klassifikatsiya i ispytanie [Gear wheels. Kind of damage. Classification and testing]. Minsk, Belorusskiy gosudarstvennyy institut standartizatsii i sertifikatsii Publ., 2009. 66 p.
- Susin A.A. Khimiko-termicheskoe uprochnenie vysokonapryazhennykh detaley [Chemical heat reinforcement of highly stressed components]. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 1999. 175 p.
- Rudenko S.P., Valko A.L. Kontaktnaya ustalost zubchatykh koles transmissiy energonasyshchennykh mashin [Contact fatigue of transmissions gears for high-energy machines]. Minsk, Belaruskaya nauka Publ., 2014. 126 p.
- 6. Rudenko S.P., Valko A.L. Soprotivlenie kontaktnoy ustalosti tsementovannykh zubchatykh koles iz khromonikelevykh

staley [Contact fatigue resistance of carburized gears from chromium-nickel steels]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal science and heat treatment], 2017, no. 1, pp. 58–62.

- Rudenko S.P., Valko A.L. Razrabotka rezhimov khimikotermicheskoy obrabotki zubchatykh koles iz ekonomno legirovannoy stali [Development of the regimes of chemical heat treatment of gear wheels from sparingly alloyed steel]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2017, no. 2, p. 34–38.
- Rudenko S.P. Valko A.L., Shishko S.A., Karpovich P.G. Soprotivlenie kontaktnoy ustalosti krupnomodulnykh zubchatykh koles iz khromonikelevykh staley [Resistance to contact fatigue of coarse-grained gears of chromiumnickel steels]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2019, no. 1, p. 68–73.
- 9. Rudenko S.P., Valko A.L., Shishko A.A. *Sposob izgotovleniya stalnoy detali* [Method of manufacturing a steel part]. Patent EU, no. 031975, 2019.
- Rudenko, S.P., Valko A.L. Osobennosti rascheta zubchatykh koles transmissiy na glubinnuyu kontaktnuyu vynoslivost [Features of analysis of gear wheels of transmissions on deep seated endurance]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 2015, no. 11, pp. 5–7.