

УДК 621.891:539.2

ПОВЫШЕНИЕ РЕСУРСА РАБОТЫ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИЙ УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ

Лидия Ивановна Куксенова¹, Сергей Андреевич Поляков^{1,2},
Мария Сергеевна Алексеева^{1,3}, Сергей Владимирович Рубцов²

¹ ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова, Москва, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³ ФГУП ВИАМ, Москва, Россия

lkukc@mail.ru

Аннотация: Проведена оценка влияния конструктивных факторов и механических свойств конструкционных материалов на ресурс работы зубчатых передач на основе расчета ресурса по результатам сравнительных испытаний на износостойкость.

Ключевые слова: зубчатая передача, износ, ресурс, износостойкость, конструкционные материалы, азотирование.

INCREASING THE SERVICE LIFE OF GEARS BASED ON THE CHOICE OF HARDENING TECHNOLOGY WORKING SURFACES OF THE TEETH

L.I. Kuksenova¹, S.A. Poljakov^{1,2}, M.S. Alekseeva^{1,3}, S.V. Rubtsov²

¹IMASH RAN, Moscow, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

³VIAM, Moscow, Russia

lkukc@mail.ru

Abstract: The influence of structural factors and mechanical properties of structural materials on the service life of gears based on the evaluation of resource life was established by the results of comparative wear resistance tests.

Key words: gear, wear, durability, wear resistance, structure materials, nitriding.

Традиционно считается, что основной причиной выхода из строя зубчатых передач является выкрашивание [1]. Однако, как показывают анализ данных эксплуатации и расчеты [2], ограничение ресурса этих передач может происходить также и по причине изнашивания. При этом износ будет приводить к изменению формы зубьев, увеличению зазоров и существенному ухудшению динамических показателей передачи. Внешний вид изношенного колеса приведен на рис. 1.



Рис.1. Зубчатые колеса: левое колесо изношенное, правое – новое

Таким образом, существует проблема обеспечения необходимого ресурса зубчатых колес при изнашивании. При этом важно выявить факторы, влияющие на ресурс, определяемый по критерию изнашивания, ранжировать данные факторы по степени значимости и подобрать наиболее благоприятные для повышения ресурса сочетания этих факторов.

Целью настоящей работы является определение конструктивных и динамических показателей, а также показателей механических свойств конструкционных материалов, на основе которых возможно составить прогноз работоспособности зубчатой передачи при изнашивании и, варьируя которые, можно повысить ее ресурс.

Для оценки причин изнашивания и его допустимых пределов рассмотрим динамические показатели передачи. Основным показателем является коэффициент динамичности, который в первоначальной формулировке определяется через изменение тормозного момента (внешней нагрузки), но может оцениваться и по деформации ведомого вала. Коэффициент динамичности нагрузки K_d определяется по формуле [1]

$$K_d = 1 + (\Delta T)/T_n = 1 + (C_f/T_n)\Sigma A_i,$$

где T_n – номинальный момент; ΔT – превышение номинального момента; C_f – коэффициент крутильной жесткости вала; A_i – амплитуды крутильных колебаний вала.

Данный подход используется в работе [3] для оценки предельного износа по критерию динамичности работы сопряжения.

Очевидно, что причиной скручивания вала могут быть не только колебания внешней нагрузки, но и внутренняя динамичность передачи, оценка которой делается на основе анализа точности изготовления и окружной скорости. Эти факторы определяют изменения силового взаимодействия зубьев в процессе работы, в том числе энергию взаимодействия [4], длительность и величину импульса взаимодействия зубьев. Причем длительность импульса T составляет величину L_ϕ/V , где V – скорость относительного движения, L_ϕ – размер стандартного зазора и погрешности формы в направлении движения. Возникновение таких импульсов будет вызывать колебания, которые выражаются в деформации вала A_i .

Отметим, что амплитуды вынужденных колебаний на зубцовых и кратных им частотах (ω_k) должны быть выше амплитуд на других частотах, поскольку именно на этих частотах происходят динамические взаимодействия зубьев. Поэтому при рассмотрении вынужденных колебаний будем оценивать, в первую очередь, именно это соотношение на основе

коэффициента весомости силового фактора, который должен определяться из соотношения [5]:

$$\beta = \frac{F_k}{F_{k=1}},$$

где

$$F_k = \left(\frac{2}{T}\right) \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} F_{\max} \cos \frac{\pi}{T} t \cos \omega_k t dt,$$

что дает интегральную характеристику силового импульса на частоте ω_k по всему рассматриваемому периоду T , который представляет собой длительность импульса и, как правило, имеет длительность существенно меньшую (в 10 и более раз), чем период зубцовой частоты. В то же время, порождаемые этим импульсом колебания должны быть кратны зубцовой частоте и могут иметь форму гармонических колебаний, но с более высокой частотой, чем зубцовая. Кроме того, сама величина F_{\max} в нашем рассмотрении, когда причиной импульса является не просто встреча нормальных зубьев, а встреча зубьев с дефектами, должна быть функцией этих дефектов, т.е. $F_{\max} = \Phi(\delta\varphi)$, где $\delta(\varphi)$ – функция дефектов, в том числе, зазоров между зубьями.

Если в исходной ситуации до начала работы зазоры определяются точностью изготовления, то по мере изнашивания они будут расти и ухудшать показатели динамичности и точности передачи. Исходя из этого, предельный износ необходимо назначать из условий недопустимости высокой динамичности, которая может характеризоваться коэффициентом внутренней динамичности, определяемой по методике [1], предельные значения которого составляют примерно 1,4–1,5. Рассмотрим взаимосвязь размеров зазоров с коэффициентом динамичности.

Таблица 1

Связь точности с коэффициентом динамичности

Прямозубая передача, окружная скорость 9 м/с, твердость $H_1 > 350$ НВ, $H_2 < 350$ НВ, делительные диаметры до 125 мм, модуль 1–3 мм		
Степень точности	Нормы кинематической точности, мкм	Коэффициент динамической нагрузки
6	40	1,32
7	62 100	1,4
8	90 126	1,48
9	142 180	1,56

Как следует из таблицы, увеличение размера поля допуска зуба до 180 мкм, то есть примерно до 20% от модуля в 1 мм, приводит к росту коэффициента динамичности свыше 1,5, что по методике [1] считается практически предельной величиной для прямозубых передач. Исходя

из этого, можно предположить, что предельный износ h_{lim} не должен превышать 0,4–0,6 от модуля (m), что будет соответствовать коэффициентам динамичности примерно 1,8–2,0. Отметим, что в [3] рекомендуется $h_{lim} = 0,6 m$.

Для оценки ресурса по критерию изнашивания существует формула [2]

$$L = \frac{h_{lim}}{\left(\Delta h_1 + \frac{\Delta h_2}{u}\right) * v},$$

где h_{lim} – предельно допустимый износ, который в соответствии с изложенными выше соображениями должен составлять не более 0,6 от модуля зуба m ; u – передаточное отношение, $u = \frac{z_2}{z_1}$, где $z_1 z_2$ – числа зубьев шестерни и колеса; v – частота оборотов вала (час⁻¹); $\Delta h_1, \Delta h_2$ – величины износов зубьев шестерни и колеса:

$$\begin{aligned}\Delta h_1 &= 2 * a * \lambda_1 * J * C_n, \\ \Delta h_2 &= 2 * a * \lambda_2 * J * C_n,\end{aligned}$$

где J – интенсивность изнашивания, безразмерная величина. Если воспользоваться данными работы [6], то для тяжелых режимов трения, например, при возвратно-поступательном движении со средней относительной скоростью скольжения $v = 0,19$ м/с, номинальном давлении ~ 10 МПа и граничной смазке, большинство конструкционных сталей дают значения $J = 10^{-8}$ – 10^{-9} . При этом нижнее значение (10^{-9}) соответствует давлению до 10 МПа, а его превышение приводит к существенному росту изнашивания, по крайней мере, в 10 раз (10^{-8}). Приведенные данные можно использовать для оценки ресурса по методу [7], когда в формулу ресурса подставляется экспериментальное значение интенсивности изнашивания, полученное в лабораторных условиях.

В приведенном выше соотношении для Δh_1 и Δh_2 C_n – коэффициент, учитывающий эллиптический закон распределения контактного давления по площадке контакта; он задается усредненным значением по диапазону (0.7..0.9);

λ_1, λ_2 – удельные скольжения, т.е. $\lambda_1 = \left[\frac{\rho_2}{u} - 1 \right], \lambda_2 = \left[\frac{\rho_1}{u} - 1 \right]$, ρ_1, ρ_2 – радиусы кривизны эвольвент в точке контакта: $\rho_1 = \frac{d_1}{2} * \cos(\alpha) * tg(\alpha_{tw}), \rho_2 = \frac{d_2}{2} * \cos(\alpha) * tg(\alpha_{tw})$, где α, α_{tw} – угол зацепления в сечении, нормальном к направлению зуба; d_1, d_2 – делительные диаметры зубчатых колес:

$$d_1 = z_1 * m, d_2 = z_2 * m,$$

где z_1, z_2 – числа зубьев шестерни и колеса.

$2 * a$ – ширина площадки контакта: $a = 1,522 * \sqrt{q_n * \frac{\rho_n}{E_n}}$, где q_n – нормальная нагрузка на единицу контактной длины, $q_n = K * \frac{F}{l_\epsilon}$, где K – коэффициент нагрузки, включающий в себя коэффициенты, характеризующие внешнюю динамическую нагрузку, внутреннюю динамическую нагрузку, неравномерность распределения нагрузки по длине контактных линий, распределение нагрузки между зубьями, F – окружная сила на колесе $F = \frac{T}{d_1}$; T – крутящий момент на валу, l_ϵ – суммарная длина контактной линии, равная ширине венца для прямозубой передачи, при этом ширина венца составляет 0,315 от межосевого расстояния.

Оценим величину ресурса работы зубчатой передачи с использованием типичных значений ее параметров и условий нагружения: число зубьев $z_1 = 20$; $z_2 = 66$; модуль $m = 1,5$, тогда предельно допустимый износ $h = 0,6 * m = 0,6 * 1,5 = 0,9$ мм.

Оценка ресурса дает величину

$$L = \frac{h}{(\Delta h_1 + \frac{\Delta h_2}{u}) * v} = 3453 \text{ час.}$$

Таким образом, оценка долговечности показывает, что для достаточно типичных конструктивных параметров и эксплуатационных условий работы зубчатых передач величина ресурса по критерию изнашивания оказывается достаточно низкой. Это следует из того, что типичный ресурс подобных передач по критерию выкрашивания составляет, как правило, не менее 10 тыс. часов, что оговаривается нормативными требованиями к редукторам. В то же время, основной составляющей расчета, определяющей порядок конечного результата, является интенсивность изнашивания, поскольку ее весомость выше остальных факторов. Эта величина в свою очередь зависит от ряда факторов, в первую очередь, механических свойств материалов. Для решения задачи повышения износостойкости рассмотрим эти факторы.

То, что материалы поверхностных слоев испытывают при трении высокую степень пластической деформации и значит изменяют свои свойства, известно сравнительно давно. Это подтверждается прямыми металлографическими исследованиями [8], где степень пластической деформации оценивалась по углу поворота зерен по мере приближения к поверхности, рентгенографическими исследованиями тонких поверхностных слоев металлических пар трения [9], исследованиями с помощью просвечивающей электронной микроскопии [10].

Указанные, а также множество других источников свидетельствуют о том, что искажения кристаллической решетки и вызывающая их плотность дислокаций при трении достигают критических значений, соответствующих стадии развитой пластической деформации при объемном деформировании, что сопровождается многократным повышением микротвердости поверхностных слоев. Эти исследования подтверждаются и в более поздних работах [11], где подчеркивается наноструктурный характер деформации, возникающей при трении. Поэтому, для обеспечения работоспособности пары трения материалы должны адаптироваться к высокой степени пластической деформации, причем структурные изменения должны доходить до субмикроскопического и наномасштабного уровня. Важно при этом, чтобы материал не терял сплошности, а значит – обладал высоким уровнем пластичности. В отношении зубчатых передач данные представления связаны с тем, что условия качения при зацеплении зубьев реализуются, в основном, только в области полюса зацепления, а условия проскальзывания определяются величинами удельных скольжений λ_1 и λ_2 .

Напряженно-деформированное состояние при контактной деформации со сдвигом ведет, как правило, к пластической деформации [9]. Результатом подобной деформации является процесс изнашивания. Рассмотрим вклады твердости и пластичности в процесс изнашивания. В случае действия тангенциальной силы при трении важна величина площади смятия, формирующаяся при тангенциальном смещении микронеровностей. Если моделировать область контакта с помощью набора сфер радиусом R_b , внедренных в пластичное полупространство на глубину h , как показано на рис.2, то площадь смятия на единичном пятне контакта составит $S = h * L$, где $L = 0,1R_b$. При общем числе пятен контакта n

= $\PhiПК/0,5(\pi L^2)$, где $\PhiПК$ – фактическая площадь контакта, общая площадь смятия $A_{гт}$ составит $A_{гт} = 2\PhiПК \cdot h/(\pi \cdot 0,1R_b)$. При характерном соотношении h/R_b не более 0,01, $A_{гт}$ составит не более 10% от $\PhiПК$.

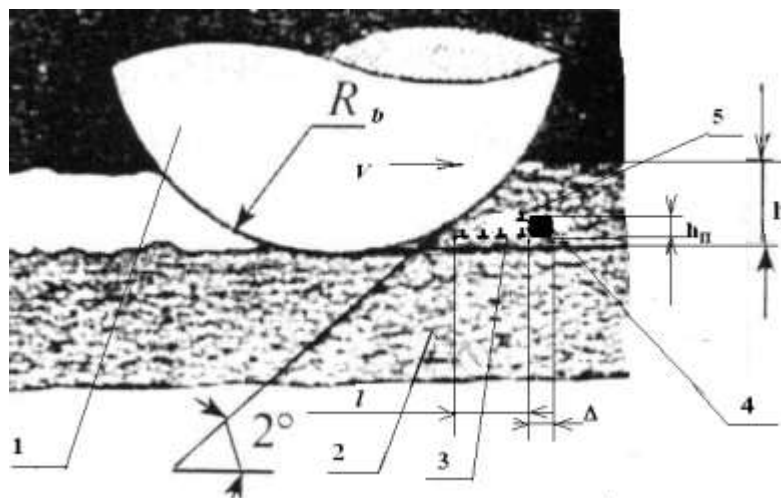


Рис.2. Схема деформирования приповерхностных слоев при трении. 1 – жесткая полусфера, моделирующая контакт шероховатостей с приведенным радиусом R_b ; 2 – деформируемый материал; 3 – плоское дислокационное скопление; 4 – дисперсное включение, тормозящее дислокации; 5 – переползающая дислокация; l – длина дислокационного скопления; Δ – размер дисперсной частицы в направлении скольжения дислокаций; h – приведенная глубина внедрения шероховатостей; h_n – высота включения, на которую должны переползти дислокации

Учитывая, что $\PhiПК = 0,01$ НПК (номинальной площади контакта), $A_{гт}$ составит не более 0,001 НПК. Очевидно, что при таких площадях смятия даже небольшое тангенциальное усилие будет приводить к пластической деформации, а напряжение смятия, возникающее на площади $A_{гт}$ будет существенно превышать твердость деформируемого материала и достигать величин порядка $10^3 - 10^4$ МПа.

Рассмотрим случай, когда в условиях внешнего трения фрикционные связи могут выступать как упругая или упруго-пластическая деформация и происходит изнашивание контактирующих поверхностей. Интенсивность изнашивания по определению $I = h/L$, где h – толщина изношенного слоя, а L – путь трения. Толщина изношенного слоя должна складываться из толщин слоев, деформированных в процессе тангенциального перемещения, при этом число циклов до разрушения соответствующего слоя n должно определяться соотношением критической $\epsilon_{кр}$ и фактической $\epsilon_{ф}$ деформаций этого слоя $n = (\epsilon_{кр}/\epsilon_{ф})$. В то же время толщина деформированного слоя должна определяться величиной внедрения или сближения поверхностей, при этом для единичной шероховатости $a_i = N_i/2\pi rHВ$, где N – нагрузка, $HВ$ – твердость по Бринеллю, r – радиус закругления шероховатости. В этом случае интенсивность изнашивания будет являться функцией нагрузки на контакт N , поскольку $h = \sum a_i/n = N/2\pi rHВn$. В общем виде для оговоренных условий формула для зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки будет иметь вид:

$$I = k P^m,$$

где k – размерный коэффициент, характеризующий механические и геометрические свойства изнашиваемой детали, $k = A_{\text{ном}}/2\pi r_{\text{HВ}}n$, пронормированный на длину пути трения, P – отношение нормальной нагрузки к номинальной площади контакта (среднее номинальное давление), m – показатель степени, учитывающий зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки.

Таким образом, как и предполагалось, механические свойства, которые учитываются при оценке интенсивности изнашивания – это твердость и пластичность. Однако, как показывает анализ, величина относительного удлинения ($\varepsilon=\delta l/l$), используемая, как правило, в качестве показателя пластичности, не соответствует той характеристике пластичности, которая требуется по физическому смыслу в приведенной выше формуле для условий трения и изнашивания, в силу существенного отличия характеристик объемных и поверхностных механических свойств, как это следует из таблицы.

Таблица 2

Сравнение механических свойств материалов в объеме и на поверхности

Материал	Объемное упрочнение ($\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{т}}$)	Относительное удлинение ($\varepsilon=\delta l/l$)	Фрикционное упрочнение по ГОСТ 23.213-84 [9,12]	Фрикционное упрочнение в активной среде [9,12]
Баббит Б88	1,5	0,60	1	1
Медь	3	0,75	6	1
Бронза	2	0,65	2	1
Чугун	1	0,02	1	1
АО20	1,5	0,30	1	1
30 ХГСА	1,3	0,30	6	1
12Х18Н9Т	1,5	0,30	2	1

Очевидно, что величина n имеет более сложную структуру, чем ε . Однако для ее определения трудно подобрать достаточно корректный экспериментальный метод, поскольку речь идет об оценке степени деформации приповерхностных слоев, а также оценке критического значения деформации. Вероятно, наиболее близким аналогом этого понятия является фрикционное упрочнение при заедании, которое показывает, как изменяется микротвердость приповерхностных слоев при заедании. Наиболее информативным вариантом определения этой величины является метод рентгеновский, позволяющий оценить физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(hkl)}$, которое дает количественную оценку степени деформации в приповерхностном слое и в ряде случаев пропорционально микротвердости [9]. Величина $\beta_{(hkl)}$ может быть использована и для оценки показателя фрикционного упрочнения, которое численно представляет собой соотношение $\beta_{(hkl)}$ до и после процесса заедания. Понятно, что это величина характеризует резерв микропластичности приповерхностных слоев.

Следует заметить, что повышенная пластичность может играть различную роль в процессе контактной деформации в зависимости от наличия других свойств, например, склонности к фрикционному упрочнению. Данное свойство в соответствии с ГОСТ 23.213-83 определяется по изменению микротвердости в процессе фрикционной деформации и определяется как $\psi_m = \mu_{\text{max}}/\mu_{\text{исх.}}$, где μ_{max} – микротвердость, достигнутая в процессе фрикционного упрочнения, $\mu_{\text{исх}}$ – исходная микротвердость того же участка поверхности. Результаты оценки свойств

некоторых материалов представлены в табл.2 [9,12]. Связь данных показателей с таким критерием работоспособности как задиростойкость установлена в работе [12], где предложено следующее соотношение:

$$P_c = (HB / \psi_m),$$

где ψ_m – степень фрикционного деформационного упрочнения, определяемая в соответствии с ГОСТ 23.213-83, P_c – нагрузка заедания, HB – твердость (объемная) более мягкого материала. Аналогичная зависимость существует и в отношении интенсивности изнашивания, поскольку фрикционное упрочнение, протекающее в приповерхностных слоях материала, имеет дислокационную природу. В свою очередь рост плотности дислокаций ведет к образованию микротрещин и изнашиванию [9]. На основе подобных критериальных соотношений может быть сделан вывод о необходимости подбора материалов с высокой степенью пластичности и низкой склонностью к фрикционному упрочнению. Подобное поведение материала в сочетании со специфическим видом деформации, эквивалентной или близкой к кручению под давлением, приводит к необходимости формирования набора свойств, существующих при сверхпластичности. Возникновение подобного свойства может происходить в тех случаях, когда эволюция структуры материала при деформации протекает в рамках процессов самоорганизации и асимптотической устойчивости этой деформации, что достигается путем подбора исходного состава и структуры материала. Подобное свойство в условиях эксплуатации, когда его проявление ведет к существенному росту работоспособности материала, можно назвать склонностью к адаптации. Если для антифрикционных материалов, таких, например, как баббиты, алюминивно-оловянные сплавы и т.п., данная проблема является во многих аспектах решенной [9,12], то для конструкционных сталей, особенно после химико-термической обработки, которая часто применяется при обработке зубчатых передач, постановка и решение этой проблемы являются актуальными.

Проблема резерва микропластичности заключается в том, что если эта величина мала, то первоначальная микропластическая деформация ведет к формированию микротрещин, поскольку исчерпание резерва пластичности создает условие для начала формирования трещин. Поэтому в процессе деформации пластичность материала не должна уменьшаться, то есть в материале должен инициироваться процесс пластифицирования. Возникать подобное сложное поведение может только в гетерогенных структурах. Примером может служить действие на поверхность металла активной среды, как это показано в табл.2. Это возможно также и в гетерогенных структурах упрочненных ХТО сталей, включающих как твердые дисперсные (как правило, наноразмерные) упрочняющие частицы, так и особые переходные фазы, соединяющие их с матрицей, - некогерентные границы. Приведем пример некоторых технологий азотирования, позволяющих создать подобные структуры [13]. Известным методом упрочнения является газовое и ионно-плазменное азотирование [6]. Как показал анализ, в некоторых вариантах этих технологий возможно получение структур с некогерентными границами дисперсных нитридных включений, что повышает пластичность материала. Как было показано экспериментально, степень некогерентности границ нитридов увеличивается по мере роста температуры азотирования. При этом для ряда сплавов наблюдается эффект конверсии износостойкости относительно твердости, - износостойкость возрастает по мере уменьшения твердости, что, вероятно, связано с увеличением

пластичности материала, которая начинает расти в связи с увеличением степени некогерентности границ нитридов с матрицей. Пример подобного эффекта показан на рис.3. Рассмотренный эффект подтверждается и для других сталей, причем наибольший эффект повышения износостойкости возникает для сталей перлитного и мартенситного классов в условиях обработки с формированием на поверхности ϵ -фазы в особом структурном состоянии [15].

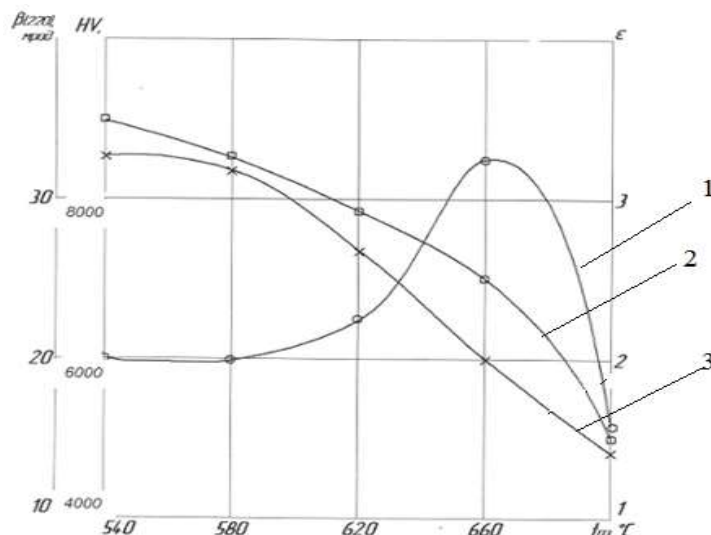


Рис.3. Влияние температуры азотирования на износостойкость ϵ (1), физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(220)}$ (2) и твердость НВ (3) стали мартенситного класса [14]

На рис.4 показано изменение интенсивности изнашивания азотированной стали 38Х2МЮА по глубине поверхностного слоя при трении по стали ШХ15 в среде Солидола [15,13].

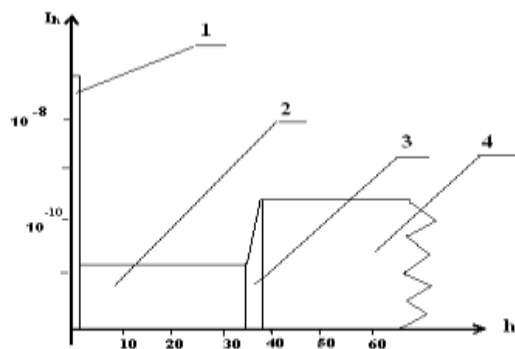


Рис.4. Схема расположения фазовых составляющих и их средняя интенсивность изнашивания (I_h) по глубине (h) от поверхности азотированной зоны стали 38Х2МЮА: 1 – слой с высоким содержанием оксидов; 2 – слой, содержащий наноразмерные частицы ϵ -фазы (Fe_{2-3}N) в матрице α -Fe, HV 6ГПа; 3 – слой, содержащий наноразмерные частицы ϵ -фазы (Fe_{2-3}N) и γ' -фазы (Fe_4N); 4 – слой, содержащий α -Fe и наноразмерные нитриды легирующих элементов, HV 9ГПа

Результаты исследований свидетельствуют о том, что при определенных режимах газового или ионно-плазменного азотирования слой с ε -фазой формируется в виде матрицы, насыщенной нанокристаллическими частицами ε -фазы, повышающими работоспособность трибосопряжения. Более того, экспериментальные исследования показали, этот слой обладает эффектом практической безызносности [15]. Оценки долговечности сопряжения показали, что путь трения до полного истирания слоя, содержащего ε -фазу, достаточен для обеспечения ресурса работоспособности многих узлов трения скольжения, включая шейки коленчатых валов, кулачки распределительных валов, плунжерные пары и тд. Важно подчеркнуть, что твердость зоны с ε -фазой имеет меньшее значение, чем с γ' -фазой, причем анализ физического уширения указывает на некогерентную связь дисперсных частиц ε -фазы с матрицей, при этом износостойкость слоя, содержащего ε -фазу – наивысшая.

Для азотированных сталей и сплавов разных структурных классов экспериментально установлены наиболее значимые характеристики структурного состояния и свойств поверхностных слоев, влияющих на уровень поверхностного разрушения при трении: размер частиц нитридов легирующих элементов (d), расстояние между ними (L), микродеформация кристаллической решетки α -твердого раствора ($\Delta d/d$), значения физического уширения рентгеновских линий азотированного твердого раствора и материала зоны деформации при трении, твердость азотированного слоя (H) и ее изменения при трении.

На основе обобщения совокупности микроскопических и макроскопических характеристик пары трения, в состав которой входит азотированный образец конструкционной стали, разработан комплексный параметр структуры и свойств диффузионного слоя, учитывающий характеристики структуры и свойств как азотированного поверхностного слоя, так и зоны поверхностной пластической деформации при трении, который имеет вид

$$Pa = \frac{\left[H_0 + K_2 \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^{1/2} \right]^{1,75} \left[D b A_y (\rho_{kp}^2 - \rho_0^2) \right]^2}{\left(K_1 + \frac{\pi D d}{L^2} \right)^2},$$

где D – средний размер блоков мозаики; b – вектор Бюргерса; A_y – концентрация частиц упрочняющей среды; ρ_0 и ρ_{kp} – плотность дислокаций до трения и критическое значение при трении соответственно.

Разработанное соотношение рекомендуется для оптимизации технологического процесса азотирования с позиций триботехники.

Проведенные исследования и их обобщение с позиций оптимальной структуры материала поверхностного слоя триботехнического назначения показали, что установленная зависимость характеристики поверхностного разрушения (относительной износостойкости) при трении азотированных сталей и комплексного параметра структурного состояния зоны поверхностной пластической деформации при трении, учитывающего также исходное структурное состояние азотированного слоя, является инвариантной, рис.5. Поэтому она может служить аналитико-экспериментальным инструментом для оптимизации технологического процесса азотирования с позиций трибологии. Проведенные многочисленные эксперименты [6] показали, что при разных сочетаниях конструкционных и смазочных материалов суммарная допустимая интенсивность изнашивания в пределах допускаемых давлений находится в области структурного параметра, соответствующего оптимальной технологии азотирования. Показатели триботехнических свойств (износостойкости, стойкости к заеданию и фрикционности) пар трения, в которых одним элементом является азотированная по технологии, подбираемой с учетом комплексного параметра, сталь 30X2MЮА, а вторым – распространенные в узлах трения бронзы, стали

чугуны свидетельствуют, что применение азотирования для повышения износостойкости, надежности и долговечности сопряжений имеет большие перспективы. Во всех исследованных парах азотированная сталь оказывается наиболее работоспособной. При этом для обеспечения требуемой долговечности сопряжений, кроме оптимизации структурного состояния азотированного поверхностного слоя стали, необходим экспериментально обоснованный выбор материала сопряженного образца и смазочного материала. Полученные нами данные по триботехническим свойствам конструкционных материалов, работающим при разных нагрузках, переменных скоростях скольжения и разных условиях смазки, могут быть рекомендованы для использования при конструировании узлов трения высокого качества.

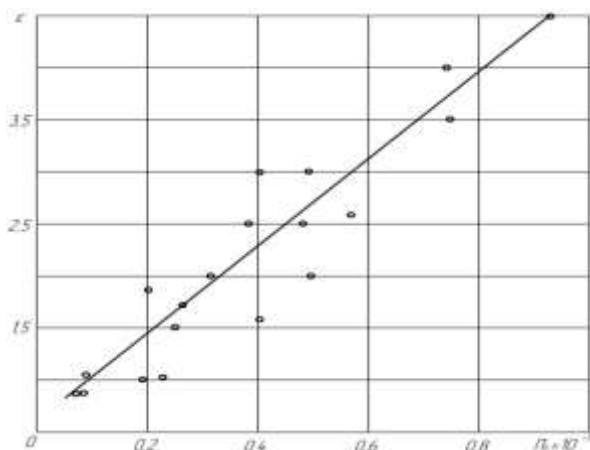


Рис.5. Взаимосвязь относительной износостойкости ε и комплексного структурного параметра Π_a азотированных сталей и сплавов

Заключение. Рассмотренные экспериментальные данные и аналитические соотношения показывают, что для износостойкости материалов зубчатых передач необходимы такие механические свойства как твердость и пластичность. Однако конкретный выбор материала не может быть ограничен констатацией подобного рода общих предположений. Как показывает эксперимент, зачастую рост износостойкости происходит при относительном снижении твердости и повышении пластичности. При этом важно отметить, что, снижаясь, твердость должна оставаться на достаточно высоком уровне, а повышение пластичности происходит специфическим образом – за счет изменения структуры приповерхностных слоев деформированного при трении материала. Это достигается путем формирования особого вида межфрагментарных некогерентных границ между упрочняющей фазой и матрицей, возникающих, в частности, при повышении температуры азотирования и оцениваемого с помощью величины физического уширения $\beta_{(hkl)}$ матричной составляющей упрочненного слоя. Важно также отметить, что величина физического уширения $\beta_{(hkl)}$ должна оцениваться не только после окончания ХТО, но и после испытаний на износостойкость, причем показателем пластичности должно служить соотношение $\beta_{(hkl)}$ до и после изнашивания, как и при оценке фрикционного упрочнения.

Величина n соответствует количеству циклов механического воздействия на материал, приводящего к его разрушению. Но если реализуются условия, при которых остаточная деформация не накапливается в приповерхностном слое, то есть он достаточно пластичен, чтобы деформация не приводила к концентрации напряжения, то число циклов может быть определено только экспериментально. В частности, если при прочих равных условиях,

включая такие факторы как твердость, шероховатость и нагрузку, интенсивность изнашивания снижается на порядок и более, то это означает соответствующее увеличение величины n . В частности, это справедливо для сталей с одинаковым составом, но разной температурой азотирования, испытанных в идентичных условиях.

Таким образом, испытание на износостойкость с определением интенсивности изнашивания и сохранением всех условий изнашивания, что возможно проконтролировать по комплексу (P/HV), коэффициенту трения f и комплексу $(R_{\max}/rb^{1/4})^c$ – микрогеометрии сопряженных поверхностей, приводит к определению числа $n = (\varepsilon_{кр}/\varepsilon_{ф})$, аналогично тому, как это получается при испытаниях на выкрашивание. При соблюдении всех условий подобия, включая выше перечисленные, интенсивность изнашивания можно рассматривать как одну из механических характеристик материала и сопоставлять ее с величиной $n = (\varepsilon_{кр}/\varepsilon_{ф})$. В этом случае при расчете ресурса эту величину можно получать экспериментально и учитывать в формуле для расчета ресурса, используя последний как критерий для выбора материала.

Проведенный анализ позволяет выбрать материалы с интенсивностью изнашивания 10^{-11} , в том числе, такие, как азотированные теплостойкие стали по определенным технологическим режимам. Приведем пример расчета ресурса с интенсивностью изнашивания 10^{-11} :

износ зубьев за единичный акт контакта:

$$\Delta h_1 = 2 * a * \lambda_1 * J * C_n = 2 * 0,102 * 0,0001 * 6 * 10^{-11} * 0,85 = 1.184 * 10^{-15} \text{ мм}$$
$$\Delta h_2 = 2 * a * \lambda_2 * J * C_n = 2 * 0,102 * 0,908 * 6 * 10^{-11} * 0,85 = 1,075 * 10^{-11} \text{ мм.}$$

Следовательно, ресурс составляет

$$L = \frac{h}{\left(\Delta h_1 + \frac{\Delta h_2}{u}\right) * v} = 3453000 \text{ час.}$$

Видно, что величина ресурса работы передачи многократно превышает нормы, требуемые стандартами на цилиндрические зубчатые редукторы.

Есть основания полагать, что применение азотирования с оптимальными параметрами структуры и свойств для повышения износостойкости, надежности и долговечности сопряжений имеет большие перспективы. Во всех исследованных парах азотированная сталь оказывается наиболее работоспособной. Для обеспечения требуемой долговечности сопряжений в целом, кроме оптимизации структурного состояния азотированного поверхностного слоя стали, необходим экспериментально обоснованный выбор материала сопряженного образца и смазочного материала. Полученные нами данные по триботехническим свойствам конструкционных материалов, работающим при разных нагрузках, переменных скоростях скольжения и разных условиях смазки, целесообразно использовать при конструировании узлов трения.

Список литературы

1. Детали машин / Под ред. Ряховского О.А. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 520 с.
2. Павлов В.Г. Ресурс работы червячной передачи по критерию износа // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – №5. – С.44–48.
3. Андриенко Л.А., Вязников В.А. Ресурс работы червячной передачи по критерию изнашивания // Известия вузов. Машиностроение. – 2011. – №4. – С.3–6.

4. Часовников Л.Д. Передачи зацеплением (зубчатые и червячные). 2-е изд., перераб. и доп., с ил. - М.: Машиностроение, 1969. – 486 с.
5. Берестнев О.В., Гоман А.М., Ишин Н.Н. Аналитические методы механики в динамике приводов. - Минск: Наука и техника, 1992. – 238 с.
6. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость конструкционных азотированных сталей и сплавов. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 518с.
7. Дроздов Ю.Н., Юдин В.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка). Под ред. Ю.Н. Дроздова. – М.: «Эко-Пресс», 2010. – 604 с.
8. Dautzenberg J.H., Zaat J.H. Quantitative determination of deformation by sliding wear // Wear. – 1973. - vol. 23, N 1. - P. 9–12.
9. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. - М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
10. Гарбар И.И. Некоторые закономерности формирования структуры металла при трении // Трение и износ. – 1981. – № 6. – С.1076–1084.
11. Коршунов Л.Г., Шабанов В.А., Черненко Н.Л. и др. Влияние контактных напряжений на фазовый состав, прочностные и трибологические свойства наноструктур, возникающих в сталях и сплавах при трении скольжения // МИТОМ. – 2008. - № 12. – С.24–33.
12. Алексеев Н.М. Закономерности пластического течения и разрушения металлов при заедании трущихся поверхностей. Автореф. диссертации на соиск. ученой степени д.т.н. - М.: МИНХ и ГП, 1983. – 20с.
13. Поляков С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Алексеева М.С. Анализ процессов микропластической деформации приповерхностных слоев азотированных конструкционных сталей // Материаловедение. – 2016. – №3. – С.24–31.
14. Мичугина М.С. Разработка структурного состояния азотированного слоя конструкционных сталей, ответственного за их износостойкость. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. - М.: МАИ (ГТУ). – 2008. – 16с.
15. Березина Е.В. Разработка технологии формирования наноструктурированного азотированного слоя конструкционных сталей для повышения их износостойкости. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2007. – 16с.

Дата поступления: 25 марта 2019 г.