
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.785.796

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ПО КРИТЕРИЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ**© 2019 г. С. А. Поляков^{1,2}, Л. И. Куксенова^{1,2,*}, М. С. Алексеева^{1,3}¹ *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*² *Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия*³ *Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Москва, Россия***e-mail: lkukc@mail.ru*

Поступила в редакцию 01.03.2018 г.

Принята к публикации 24.04.2019 г.

Рассмотрены экспериментальные данные и аналитические соотношения для оценки износостойкости материалов зубчатых передач. Описана роль твердости и резерва пластичности в установлении уровня износостойкости сталей. Предложен способ выбора материала и прогнозирования ресурса зубчатого зацепления с учетом характеристик деформации в зоне контактного взаимодействия.

Ключевые слова: износ, конструкционные материалы, твердость, пластичность, зубчатые передачи

DOI: 10.1134/S0235711919040126

Одной из основных причин выхода из строя зубчатых колес является выкрашивание и изнашивание рабочих поверхностей зубьев, причем оба процесса имеют эквивалентную значимость для наступления отказа, однако в ряде случаев изнашивание может превалировать [1]. Стандартные методики [2] предлагают выбирать материалы и прогнозировать ресурс сопряжений по характеристикам механических свойств. При этом практика испытаний и эксплуатации свидетельствует, что они не дают однозначных ответов на поставленные вопросы. Связано это с тем, что разработка подобных методик проводилась сравнительно давно, и учет реального поведения материала в условиях контактных деформаций был недостаточно проработан. Наиболее существенная неточность подобных методик заключается в отсутствии учета реальных микропластических сдвигов, которые и приводят, в конечном счете, к образованию трещин и разрушению. Следует особенно подчеркнуть, что процессы деформации, протекающие в приповерхностных слоях деталей в условиях контактного взаимодействия, неизбежно связаны со сдвиговыми процессами [3], что, в свою очередь, приводит к пластической деформации, которая в [2] практически не учитывается.

В настоящее время для определения связи механических свойств материалов зубчатых колес с их долговечностью по критериям выкрашивания и износа используются испытания на контактную выносливость при качении с проскальзыванием. Однако для оценки такой взаимосвязи требуется адекватная модель процесса изнашивания, которая позволяет по результатам испытаний и экспериментальным показателям твердости, числа циклов до разрушения при заданном напряжении, интенсивности изнашивания сделать прогноз долговечности.

Целью настоящей работы является определение показателей механических свойств конструкционных материалов, на основе которых возможен прогноз работоспособности материала при сдвиговой контактной деформации.

То, что поверхностные слои материалов при трении испытывают высокую степень пластической деформации известно давно. Это подтверждается прямыми металлографическими [4] и рентгенографическими исследованиями [5], исследованиями с помощью просвечивающей электронной микроскопии [6].

Указанные, а также множество других источников свидетельствуют о том, что искажения кристаллической решетки (плотность дислокаций) в зоне деформации при контактном взаимодействии твердых тел даже при низких давлениях достигают критических значений, соответствующих стадии развитой пластической деформации для условий объемного деформирования, что сопровождается многократным повышением микротвердости поверхностных слоев. Эти исследования подтверждаются и в более поздних работах [7], где подчеркивается наноструктурный характер деформации, возникающей при трении. Поэтому для обеспечения требуемой работоспособности пары трения материалы должны адаптироваться к высокой степени пластической деформации, причем структурные изменения должны доходить до субмикроскопического и наномасштабного уровней. 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. При этом условия проскальзывания определяются величинами удельных скольжений λ_1 и λ_2 , которые составляют $\lambda_1 = |(\rho_2/\rho_1)/u - 1|$ и $\lambda_2 = |(\rho_1/\rho_2)u - 1|$, где ρ_1 – радиус кривизны рабочей поверхности зуба шестеренки, ρ_2 – радиус кривизны зуба колеса, u – передаточное отношение зубчатой пары.

Как отмечалось выше, напряженно-деформированное состояние при контактной деформации со сдвигом ведет, как правило, к пластической деформации. Результатом деформации является процесс изнашивания. Оценка его с помощью безразмерной величины интенсивности изнашивания (I_h) показывает, что 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 после ХТО дают значения $I_h = 10^{-9}$. Это соответствует износу в один микрон на километр пути трения [8].

Рассмотрим вклады твердости и пластичности в процесс изнашивания. В случае действия тангенциальной силы при трении важна величина площади смятия, формирующейся при тангенциальном смещении микронеровностей. Если моделировать область контакта с помощью набора сфер радиусом R_b , внедренных в пластичное полупространство на глубину h , то площадь смятия на единичном пятне контакта составит $S = h^*L$, где $L = 0.1R_b$. При общем числе пятен контакта $c = \text{ФПК}/0.5(\pi L^2)$, где ФПК – фактическая площадь контакта, общая площадь смятия $A_{\tau} = 2\text{ФПК} \cdot h/(\pi \tau 0.1R_b)$. При характерном соотношении h/R_b не более $0.01A_{\tau}$ составит не более 10% от ФПК.

Учитывая, что ФПК = 0.01 НПК (номинальной площади контакта), A_{τ} 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_{τ} , 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 упругопластическая деформация. Интенсивность изнашивания – это отношение толщины изношенного слоя к пути трения. Толщина изношенного слоя складывается из толщин слоев, деформированных в процессе тангенци-

Таблица 1. Сравнение механических свойств материалов в объеме и на поверхности

Материал	Объемное упрочнение (σ_B/σ_T)	Относительное удлинение ($\epsilon = \Delta\ell/\ell$)	Коэффициент фрикционного упрочнения в неактивной среде по ГОСТ 23.213-84 [5, 9, 10]	Коэффициент фрикционного упрочнения в активной среде [5, 9]
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

ального перемещения, при этом число циклов до разрушения соответствующего слоя n определяется соотношением критической $\epsilon_{кр}$ и фактической $\epsilon_{ф}$ деформаций этого слоя $n = \epsilon_{кр}/\epsilon_{ф}$. В то же время толщина деформированного слоя определяется величиной внедрения или сближения поверхностей, имеющей вид для единичной шероховатости $a_i = N_i/2\pi r H_V$, где N – нагрузка, H_V – твердость по Бринеллю, r – радиус закругления шероховатости. В этом случае интенсивность изнашивания будет являться функцией нагрузки на контакте N , поскольку толщина изношенного слоя $h = \Sigma a_i/n = N/2\pi r H_V n$. Следовательно, в общем виде для оговоренных условий формула, отражающая зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки, будет иметь вид

$$I = \kappa P^m, \quad (1)$$

где κ – размерный коэффициент, характеризующий механические и геометрические свойства изнашиваемой детали, $\kappa = A_{ном}/2\pi r H_V n$, пронормированный на длину пути трения, P – отношение нормальной нагрузки к номинальной площади контакта (среднее номинальное давление), m – показатель степени, учитываемый нелинейную зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки в случае нелинейности.

Следовательно, среди характеристик механических свойств, которые влияют на интенсивность изнашивания, основными являются твердость и пластичность. Однако, как показывает анализ, величина относительного удлинения ($\epsilon = \Delta\ell/\ell$), используемая, как правило, в качестве показателя пластичности по физическому смыслу не соответствует характеристике пластичности, заложенной в формуле (1), в силу существенного отличия объемных и поверхностных характеристик механических свойств материала, как это следует из табл. 1.

Очевидно, что величина n имеет более сложную структуру, чем ϵ . Однако для ее определения трудно подобрать экспериментальный метод, поскольку достаточно сложно оценить степень деформации приповерхностных слоев, а также оценить критическое значение деформации.

Вероятно, наиболее близким аналогом этого понятия является фрикционное упрочнение при заедании. Наиболее информативным вариантом определения величины n является рентгеновский метод [11], позволяющий оценить физическое уширение рентгеновских линий β , которое дает количественную оценку степени деформации в приповерхностном слое и в ряде случаев пропорционально микротвердости [5]. Величина β может быть использована и для оценки показателя фрикционного упрочнения, которое можно представить, как соотношение β до и после процесса заедания.

Понятно, что величина физического уширения рентгеновских линий характеризует резерв микропластичности деформированных при трении приповерхностных слоев, который в процессе трения может возрасти [5, 10, 12], нарушая линейную связь I_h и n .

Рассмотрим основные методики оценки ресурса зубчатых колес, учитывающие свойства конструкционных материалов.

Оценки долговечности для сопряжений типа зубчатых передач на основе данных по твердости их поверхностей можно получить из расчетных формул, приводимых в ряде учебников и монографий, например, [2]. В частности, время безотказной работы L , то есть ресурс, может быть определен следующим образом

$$L = N_k / (60n_k n_c),$$

где N_k – требуемый ресурс зубчатого колеса в циклах; n_k – число оборотов колеса; n_c – число зацеплений зубьев колеса.

Величину N_k можно представить через значение коэффициента долговечности Z : $Z = \sqrt[6]{(N_{gh}/\mu N_k)}$, где N_{gh} – число циклов, соответствующее напряжению, равному пределу выносливости, μ – коэффициент, характеризующий режим нагружения. Соответственно $N_k = N_{gh}/Z^6\mu$, где $N_{gh} = (HB)^3$.

При этом коэффициент долговечности может быть определен через допускаемое напряжение $[\sigma]$ и межосевое расстояние a_w , задаваемые из конструктивных соображений.

Таким образом, ресурс сопряжения типа зубчатой передачи имеет кубическую зависимость от твердости. Однако практика показала, что материалы, обладающие одинаковыми или близкими значениями твердости, но обработанные по разным технологиям, могут иметь многократные различия в износостойкости, в том числе, включая вариант, когда материал с меньшей твердостью имеет более высокую износостойкость [12]. Поэтому задача по формулировке требований к механическим свойствам приповерхностных слоев машиностроительных материалов в условиях контактных деформаций не может считаться полностью решенной указанным выше способом. Чем сложнее условия работы узлов трения современных машин и механизмов, тем острее встает проблема разработки методологии выбора материалов триботехнического назначения. В частности, рассматриваются более сложные, чем в стандартных методиках, комплексы механических свойств [3]. Так при линейном контакте (характерном для эвольвентного зубчатого зацепления) показано, что давление распределяется поперек площадки контакта по эллиптическому закону. Для этого случая вводится понятие погонной нагрузки $q = Q/\ell_k$, где Q – нормальная сила, сжимающая образцы, ℓ_k – длина площадки контакта. Тогда нормальная составляющая напряжений в центральной точке контакта $P_0 = 2q/\pi ab$; где $b = 1.128\sqrt{(\eta q R_1 R_2 / R_1 \pm R_2)}$, η – комплексная характеристика упругих свойств материалов; R_i – радиусы кривизны контактирующих поверхностей; a – полуширина эллиптической площадки контакта. Если в точке контакта ввести координаты, направив ось z вертикально, а ось y перпендикулярно линии контакта, то, следуя работе [3], на поверхности контакта при $y = z = 0$

$$\sigma_x = -2\mu P_0 \sigma_y = \sigma_z - P_0,$$

где μ – коэффициент Пуассона. Для учета тангенциальной составляющей используют значение коэффициента трения. Установлено [3], что тангенциальные силы в наибольшей мере влияют на изменение растягивающих напряжений σ_y на конце малой эллиптической площадки контакта в зоне растяжения. Максимальное значение отно-

сительного нормального напряжения на конце малой полуоси $\sigma_{y\max}$, равно сумме нормальной σ_y^N и тангенциальной σ_y^m компонент

$$\sigma_{y\max} = \sigma_y^N + \sigma_y^m, \quad \text{причем} \quad \sigma_y^m = f\sigma_y^N,$$

где f – коэффициент трения. Значение $\sigma_{y\max}$ играет ключевую роль в процессе контактного разрушения при качении с проскальзыванием. Число циклов до разрушения с вероятностью 50% в соответствии с экспериментальными данными, полученными при испытаниях ролик по ролику при качении с проскальзыванием для стали ШХ15 с твердостью 60–61 HRC составляет $N_{50} = (9.06 \times 10^{18})/\sigma_{y\max}^3$ [3].

Таким образом, ресурс при контактном взаимодействии существенно зависит от коэффициента трения, который определяется антифрикционными свойствами материалов и условиями смазывания, что не может быть учтено с помощью такой характеристики как твердость. Аналогичная ситуация складывается и с изнашиванием. В расчетном определении интенсивности изнашивания для учета связи нормальной и тангенциальной деформации также используется коэффициент трения. При этом элементный закон изменения интенсивности изнашивания имеет вид, используемый в ряде основополагающих работ, в частности, в [1]

$$I = \kappa[(P/HV\epsilon)(\sqrt{1+f^2})]^{m*}(R_{\max}/rb^{1/\nu})^c, \quad (2)$$

где P – нагрузка (МПа); ϵ – относительное удлинение материала при разрыве (характеристика пластичности); R_{\max} – максимальная высота шероховатости; r – радиус закругления шероховатости; $b^{1/\nu}$ – безразмерный показатель опорной кривой, характеризующей распределение материала в пространстве между шероховатыми поверхностями; k, c – постоянные. В уравнении (2) первый комплекс $(P/HV\epsilon)$ характеризует степень нагруженности материалов деталей в зоне контакта; второй комплекс $-(R_{\max}/rb^{1/\nu})^c$ – микрогеометрию сопряженных поверхностей. Режим смазки трибосопряжений учитывается параметром $\xi(f)$, который в зависимости от природы материала и степени влияния сил трения на износ принимается как $\xi(f) = f, (1+f), (1+f^2)^{0.5}$. Выбор конкретного значения этого параметра, как и возможность применения уравнения (2), должен устанавливаться по результатам триботехнических испытаний материала [1]. Кроме того, в (2) учитывается пластичность через величину ϵ , которая также связана с тангенциальной составляющей деформации при трении, поскольку именно тангенциальное смещение переводит деформацию в необратимую область. Однако используемая в расчетах величина ϵ представляет реальную деформацию, происходящую при объемном испытании материала на разрывной машине, в то время, как при трении деформация имеет контактно-сдвиговой характер и, как отмечалось выше в соответствии с работами [4–12], имеет существенные отличия.

Отметим, что формула (2) достаточно сложна для реальной оценки интенсивности изнашивания, поскольку содержит ряд величин, определение которых как теоретическим, так и экспериментальным путем весьма затруднительно. Это, в частности, относится к величине коэффициента трения, поскольку расчетные методы [13] неточны и не предназначены для подобных оценок в условиях смешанной смазки, а экспериментально выделить составляющую, отвечающую за значение коэффициента трения, практически невозможно.

Кроме того, в основе расчета, разработанного в работе [1], лежит представление о монотонно возрастающей зависимости интенсивности изнашивания от давления в контакте сопряженных деталей. Такая зависимость является достаточно распространенной формой для оценки износостойкости [14], хотя существуют ограничения по ее применению [15].

Отметим, что повышенная пластичность может играть различную роль в процессе контактной деформации в зависимости от наличия других свойств, например, склон-

ности к фрикционному упрочнению. Данное свойство в соответствии с ГОСТ 23.213-83 определяется по изменению микротвердости в процессе фрикционной деформации и определяется как $\psi_m = \mu_{\max}/\mu_{\text{исх}}$, где μ_{\max} – микротвердость, достигнутая в процессе фрикционного упрочнения, $\mu_{\text{исх}}$ – исходная микротвердость того же участка поверхности. Связь показателей фрикционного упрочнения с критерием задиристости установлена в работе [9], где предложено следующее соотношение

$$P_c = (\text{НВ}/\psi_m),$$

где ψ_m – степень фрикционного деформационного упрочнения, P_c – нагрузка заедания, НВ – твердость (объемная) более мягкого материала. Аналогичная зависимость существует и в отношении интенсивности изнашивания, поскольку фрикционное упрочнение, протекающее в приповерхностных слоях материала, имеет дислокационную природу.

На основе подобных критериальных соотношений может быть сделан вывод, что выбор материалов триботехнического назначения должен рассматривать высокую степень пластичности и твердости и низкую склонность к фрикционному упрочнению. Такое сочетание характеристик свойств материала в совокупности со специфическим видом деформации, эквивалентным или близким 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 [12, 15, 16]. Подобное свойство в условиях эксплуатации, когда его проявление ведет к существенному росту работоспособности материала, можно назвать склонностью к адаптации. Если для антифрикционных материалов, например, баббитов, алюминий-оловянных сплавов и т.п., данная проблема является во многих аспектах решенной [9, 10], то для конструкционных сталей, особенно после химико-термической обработки, постановка и решение этой проблемы являются актуальными.

Таким образом, анализ процесса изнашивания показывает, что резерв пластичности также играет важную роль в сопротивлении износу. Проблема заключается в том, что если эта величина мала, то первоначальная микропластическая деформация ведет к формированию микротрещин, ввиду исчерпания резерва пластичности. Поэтому в процессе деформации пластичность материала не должна уменьшаться, то есть в материале должен инициироваться процесс пластифицирования. Возникать подобное сложное поведение может, как правило, в гетерогенных структурах. Примером может служить действие на поверхность металла активной среды, как это показано в таблице. Это возможно также в гетерогенных структурах, упрочненных ХТО сталей, включающих как твердые дисперсные (часто, наноразмерные) упрочняющие частицы, так и особые переходные фазы, соединяющие их с матрицей, – некогерентные границы.

Примером может служить технология азотирования, позволяющая создать подобную структуру [17–19]. При определенных условиях возможно получение структур с некогерентными границами дисперсных нитридных включений, что повышает пластичность, и в результате достигается существенное повышение износостойкости материала. Экспериментально было показано [20], что 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, рис. 1, что, вероятно, связано с увеличением пластичности материала, которая начинает расти в связи с увеличением степени некогерентности границ нитридов с матрицей [20].

Известно, что формирование структуры и свойств при азотировании представляет собой сложный процесс. Азотированный слой имеет слоистое и многофазное строе-

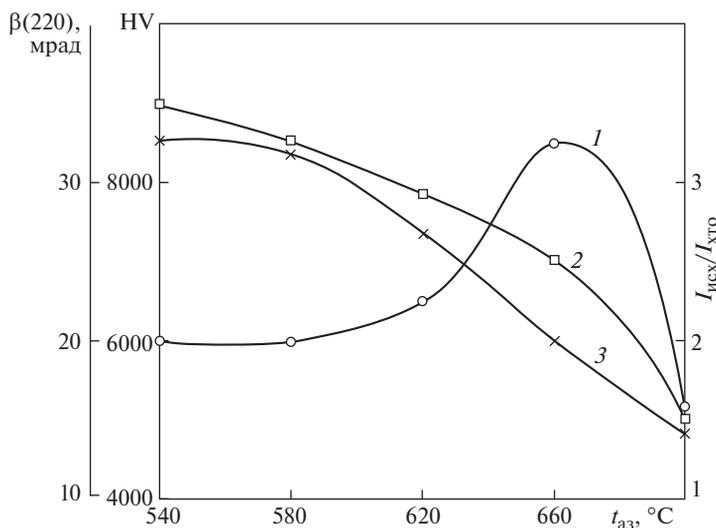


Рис. 1. Влияние температуры азотирования на износостойкость ($I_{исх}/I_{хто}$) (1), физическое уширение рентгеновских линий (β) (2) и твердость (HV) (3) стали мартенситного класса ВКС-7.

ние, рис. 2 [18]. При определенных режимах газового или ионно-плазменного азотирования поверхностный слой, преимущественно содержащий ϵ -фазу, формируется в виде матрицы, насыщенной нанокристаллическими частицами ϵ -фазы ($Fe_{2-3}N$), существенно повышающими работоспособность трибосопряжения [17, 18, 21]. Более того, экспериментальные исследования показали, что слой, содержащий ϵ -нитриды в наноструктурном состоянии обладает эффектом практической безызносности [18]. Оценки долговечности сопряжения указывают, что путь трения до полного истирания слоя ϵ -фазы достаточен для обеспечения ресурса работоспособности многих узлов трения скольжения, включая шейки коленчатых валов, кулачки распределительных валов, плунжерные пары и т.д. Важно подчеркнуть, что твердость зоны с ϵ -фазой имеет меньшее значение, чем зоны с нитридами легирующих элементов, причем анализ физического уширения рентгеновских линий указывает на некогерентную связь дисперсных частиц ϵ -фазы с матрицей, при этом износостойкость этого поверхностного слоя — наивысшая.

Заключение. Рассмотренные экспериментальные данные и аналитические соотношения показывают, что для обеспечения высокой износостойкости материалов зубчатых передач среди характеристик механических свойств определяющими являются твердость и пластичность (резерв пластичности). Наибольший ресурс изделия наблюдается в результате роста износостойкости при относительном снижении твердости и повышении пластичности. При этом твердость, снижаясь, остается на достаточно высоком уровне, а повышение пластичности происходит специфическим образом — за счет изменения структуры приповерхностных деформированных микрообъемов изделия. Это достигается путем формирования в материале особого вида межфрагментарных некогерентных границ, возникающих, в частности, при повышении температуры азотирования для сталей перлитного и мартенситного классов, что корректно можно установить с помощью определения величины физического уширения рентгеновских линий (β) матричной составляющей упрочненного слоя. Величина β должна оцениваться не только после ХТО, но и после испытаний на износостойкость, причем пока-

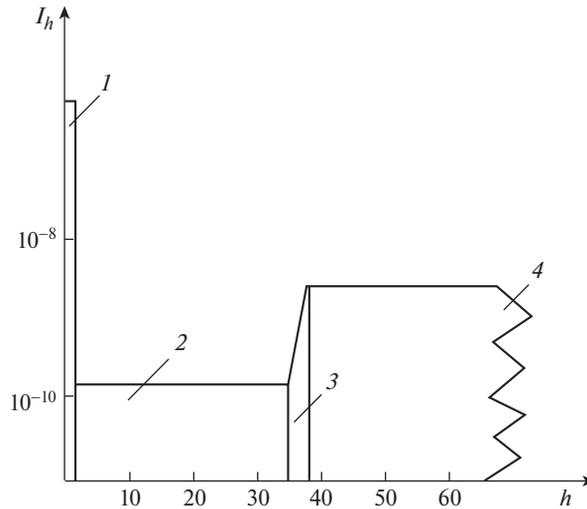


Рис. 2. Схема фазовых составляющих и интенсивность изнашивания по глубине от поверхности азотированной зоны стали 38Х2МЮА. I_h – интенсивность изнашивания; h – расстояние от поверхности (мкм); 1 – слой с высоким содержанием оксидов; 2 – слой, содержащий наноразмерные частицы ϵ -фазы (Fe_{2-3}N) в матрице α -Fe, 6 ГПа; 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, 9 ГПа.

зателем пластичности должно служить соотношение β до и после изнашивания, как и при оценке фрикционного упрочнения.

Величины объемной твердости и относительного удлинения материала при разрыве не являются обоснованными критериями выбора материалов для зубчатых передач. Являясь характеристиками объемных свойств, они не отражают эволюцию механических свойств приповерхностных слоев изделий при контактном взаимодействии. Наиболее адекватна для подобной оценки величина, равная отношению критической и фактической деформации $n = \epsilon_{\text{кр}}/\epsilon_{\text{ф}}$ материала приповерхностного слоя, причем она должна определяться с использованием совокупности механических и металлофизических методов.

В условиях, когда остаточная деформация при трении не накапливается в приповерхностном слое (материал достаточно пластичен), то число циклов до разрушения n может быть определено только экспериментально, поскольку критическое значение деформации $\epsilon_{\text{кр}}$ не достигается и связь деформации с числом циклов становится нелинейной. Если при прочих равных условиях, включая твердость, шероховатость и нагрузку, интенсивность изнашивания изменяется, то это означает соответствующее изменение числа n . Следовательно, испытания на износостойкость с определением интенсивности изнашивания и сохранением всех условий изнашивания, что возможно

контролировать по комплексу (P/HV) , коэффициенту трения $(\sqrt{1+f^2})$ и комплексу $(R_{\text{max}}/rb^{1/\nu})^c$ – микрогеометрии сопряженных поверхностей, создают базу для определения числа $n = (\epsilon_{\text{кр}}/\epsilon_{\text{ф}})$. В этом случае при соблюдении всех условий подобия, интенсивность изнашивания можно рассматривать как одну из механических характеристик материала и сопоставлять с величиной $n = \epsilon_{\text{кр}}/\epsilon_{\text{ф}}$, отражающей физические процессы в зоне деформации. Однако при расчете ресурса необходимо учитывать, что связь интенсивности изнашивания и величины n может быть нелинейной и ее необхо-

димо получать экспериментально, применяя в качестве критерия для выбора материала и используя для прогнозирования ресурса зубчатых передач.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В.Г., Яговитов В.Д. Ресурс работы косозубой зубчатой передачи по условию предельно допустимого износа // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 4. С. 50.
2. Детали машин / Под ред. О.А. Ряховского. 4-е изд. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 465.
3. Орлов А.В. Контактная прочность и факторы ее определяющие. Современная трибология. Итоги и перспективы / Под ред. Фролова К.В. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. С. 70.
4. Dautzenberg J.H., Zaat J.H. Quantitative determination of deformation by sliding wear // Wear. 1973. V. 23. № 1. P. 9.
5. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. С. 212.
6. Гарбар И.И. Некоторые закономерности формирования структуры металла при трении // Ж. Трение и износ. 1981. № 6. С. 1076.
7. 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 // Ж. МиТОМ. 2008. № 12. С. 24.
8. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость конструкционных азотированных сталей и сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 518.
9. Алексеев Н.М. Закономерности пластического течения и разрушения металлов при заедании трущихся поверхностей. Автореф. дисс. ... докт. тех. наук. М.: МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1983. С. 22.
10. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. М.: Наука, 1981. С. 128.
11. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. М.: Наука, 1979. С. 118.
12. Поляков С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Алексеева М.С. Анализ процессов микропластической деформации приповерхностных слоев азотированных конструкционных сталей // Ж. Материаловедение. 2016. № 3. С. 24.
13. Михин Н.М. Определение сил и коэффициентов внешнего трения. Основы трибологии / Под ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2001. С. 664.
14. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. С. 560.
15. Поляков С.А. Самоорганизация при трении и эффект безызносности. Монография. М.: РГАУ-МСХА, 2009. С. 108.
16. Поляков С.А., Куксенова Л.И. Механизмы деформации приповерхностных слоев металлов и возможность возникновения самоорганизации в этих процессах // Ж. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2006. № 4. С. 51.
17. Герасимов С.А., Поляков С.А., Куксенова Л.И. и др. РФ Патент 2522872, 2013.
18. Березина Е.В. Разработка технологии формирования наноструктурированного азотированного слоя конструкционных сталей для повышения их износостойкости. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. С. 16.
19. Березина Е.В., Мичугина М.С., Лаптева В.Г., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость стали после различных способов азотирования // Ж. Деформация и разрушение материалов. 2008. № 4. С. 29.
20. Мичугина М.С. Разработка структурного состояния азотированного слоя конструкционных сталей, ответственного за их износостойкость. Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М.: МАИ (ГТУ), 2008. С. 16.
21. Герасимов С.А., Крапошин В.С., Лисоцкий И.В., Березина Е.В., Лаптева В.Г., Куксенова Л.И. Влияние нанокристаллической фазы нитридов железа на износостойкость азотированной стали 38Х2МЮА // Труды Всероссийской научно-технической конференции "Машиностроительные технологии", посвященной 140-летию высшего технологического образования в МГТУ им. Н.Э. Баумана. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. С. 216.