

ЧЕБЫШЕВСКИЙ СБОРНИК

Том 21. Выпуск 3.

УДК 621.2.082.18

DOI 10.22405/2226-8383-2020-21-3-272-291

**Эмпирические математические экспертные модели
пластичности, прочности и износостойкости материалов
на примере стали Р18**

А. Д. Бреки, А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева, В. Ю. Кузовлев

Александр Джалюльевич Бреки — кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (г. Санкт-Петербург).

e-mail: albreki@yandex.ru

Александр Евгеньевич Гвоздев — доктор технических наук, профессор, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (г. Тула).

e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru

Ольга Владимировна Кузовлева — кандидат технических наук, доцент, доцент, Российский государственный университет правосудия (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Владислав Юрьевич Кузовлев — старший преподаватель, полковник полиции, Московский университет МВД России имени В.Я. Кикотя (г. Москва).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Аннотация

В работе приведен анализ результатов лабораторных экспериментальных исследований параметров, характеризующих пластичность, прочность и износостойкость инструментальной стали Р18, полученных в ходе материаловедческих экспертиз. Разработаны новые эмпирические математические экспертные модели зависимости показателей пластичности и прочности стали Р18 от температуры. Получены эмпирические математические экспертные модели зависимости механических свойств и износостойкости стали Р18 от различных факторов. Показана возможность аналитического представления сложных экспериментальных графических зависимостей механических и трибологических свойств стали Р18 от различных факторов в целях использования в судебно-экспертной практике.

Ключевые слова: аппроксимация, износостойкость, инструментальная сталь Р18, математическая модель, пластичность, прочность, судебная металловедческая экспертиза, температурная зависимость, трение.

Библиография: 52 названий.

Для цитирования:

А. Д. Бреки, А. Е. Гвоздев, О. В. Кузовлева, В. Ю. Кузовлев Эмпирические математические экспертные модели пластичности, прочности и износостойкости материалов на примере стали Р18 // Чебышевский сборник, 2020, т. 21, вып. 3, с. 272–291.

CHEBYSHEVSKII SBORNIK

Vol. 21. No. 3.

UDC 621.2.082.18

DOI 10.22405/2226-8383-2020-21-3-272-291

Empirical mathematical models of plasticity, strength and wear resistance of materials on the example of P18 steel

A. D. Breki, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva, V. Yu. Kuzovlev

Alexander Dzhalyulyevich Breki — candidate of technical Sciences, associate Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (St. Petersburg).

e-mail: albreki@yandex.ru

Alexander Evgenievich Gvozdev — doctor of engineering, Professor, Professor, Tula state pedagogical University L.N. Tolstoy (Tula).

e-mail: gvozdev.alexandr2013@yandex.ru

Olga Vladimirovna Kuzovleva — candidate of technical Sciences, docent, docent, Russian State University of justice (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Vladislav Yurievich Kuzovlev — senior lecturer, police Colonel, Moscow University of the Ministry of internal Affairs of Russia named after V.Ya. Kikotya (Moscow).

e-mail: kusovleva@yandex.ru

Abstract

The paper analyzes the results of laboratory experimental studies of parameters that characterize the plasticity, strength and wear resistance of P18 tool steel obtained during material science examinations. New empirical mathematical expert models have been developed for the dependence of P18 steel ductility and strength on temperature. Empirical mathematical expert models of the dependence of mechanical properties and wear resistance of P18 steel on various factors are obtained. The possibility of analytical representation of complex experimental graphical dependencies of mechanical and tribological properties of P18 steel on various factors for use in forensic practice is shown.

Keywords: approximation, wear resistance, P18 tool steel, mathematical model, plasticity, strength, forensic examination of metals and alloys, temperature dependence, friction.

Bibliography: 52 titles.

For citation:

A. D. Breki, A. E. Gvozdev, O. V. Kuzovleva, V. Yu. Kuzovlev, 2020, "Empirical mathematical models of plasticity, strength and wear resistance of materials on the example of P18 steel", *Chebyshevskii sbornik*, vol. 21, no. 3, pp. 272–291.

1. Введение

Разработка ресурсосберегающих технологий при получении заготовок металлорежущего инструмента из стали Р18 является актуальной задачей современного металловедения и обработки металлов давлением. Достигается это различными методами обработки металлических материалов в силовых, скоростных и различных других энергетических полях. Среди этих методов особое место занимают методы, связанные с использованием состояния сверхпластичности и повышенной пластичности [1].

С другой стороны, металлорежущий инструмент из стали Р18 должен обладать высокой износостойкостью, неразрывно связанной с её различными механическими свойствами и состояниями. Кроме того, криминалистическое исследование подобных состояний металлов и сплавов является актуальной задачей металловедческой судебной экспертизы, которая является одним из средств доказывания в системе уголовного судопроизводства. Более глубокое использование специальных знаний в области современного металловедения при раскрытии и расследовании преступлений должно опираться как на практические, так и на эмпирические разработки в этой области.

2. Основной текст статьи

Металловедческие аспекты в проблеме повышения износостойкости инструмента имеют первостепенное значение, хотя многие возможности в этом плане уже реализованы. Роль структурных составляющих сталей различных классов и каждой структурной основы предстоит ещё обстоятельно изучить, учитывая большое количество факторов, определяющих износостойкость в парах трения [2]. Следует отметить, что износостойкость зависит от реологического поведения материала поверхностного слоя режущего инструмента в связи с наличием высоких температур на фактической площади контакта и пластического течения субмикро- и микронеровностей. В механике сплошных сред для количественного описания влияния структуры на реологическое поведение материалов в состоянии сверхпластичности используются уравнения состояния [3]:

$$\Phi(\sigma, \xi, D_k, T, t, \dots) = 0, \quad (1)$$

где σ — напряжение течения; ξ — скорость деформации; D_k — совокупность параметров, характеризующих состояние структуры материала; T — температура деформации; t — время. От приведённых выше факторов также зависит и износостойкость.

В силу сложности процессов пластического деформирования и, тем более, трения и изнашивания, часто используются однофакторные математические модели, выражающие зависимости пластичности, прочности и износостойкости от какого-либо существенного фактора. В частности, для выявления и анализа состояния сверхпластичности определяют зависимость пластичности стали от температуры, имеющую в общем случае сигмоидальный вид [1]. Еникеев Ф.У. в работе [4], например, предлагает аппроксимировать сигмоидальную кривую сверхпластичности кубическим полиномом. Однако следует отметить, что кривые сверхпластичности далеко не всегда имеют чисто сигмоидальный характер. Более того, в силу сложности даже однофакторных зависимостей пластичности, прочности и износостойкости от различных факторов, не всегда удаётся определить удовлетворительные аппроксимирующие функции. История физики знает немало примеров, когда нелинейная функция на коротком участке изменения переменной первоначально аппроксимировалась как линейная. В трибологии, в силу высокой сложности изучаемых явлений, часто выявляются такие экспериментальные зависимости, в которых одновременно присутствуют черты нелинейных и линейных функций.

В связи с этим, в границах данной работы реализована аппроксимация экспериментальных результатов различных авторов, проводивших исследования пластичности, прочности и

износостойкости инструментальной стали Р18, посредством использования сложных функций, объединяющих в себе линейные и нелинейные зависимости. Для этой цели были использованы функции, разработанные Бреки А.Д. при анализе результатов испытаний различных материалов на трение и износ в области трибологии [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]. Одна из таких функций в общем виде записывается следующим образом [15, 16, 17, 18, 19, 20]:

$$\tilde{\theta}_{\Sigma}(x) = C + \sum_{i=1}^k \frac{\Delta C_i}{1 + \exp(-r_i(x - x_{ci}))}, \quad (2)$$

где C — постоянная, r_i — параметр, характеризующий резкость перехода (скачкообразного либо плавного) от одного постоянного значения функции к другому, ΔC_i — разности постоянных значений функции до и после перехода, x_{ci} — абсциссы центров перехода, k — количество переходов функции от одного постоянного значения к другому постоянному значению. Функция (2) представляет собой алгебраическую сумму сигмоидальных (логистических) функций и постоянной.

Проинтегрировав функцию [2] получим [6, 11, 17]:

$$\tilde{\beta}_{\Sigma}(x) = Cx + C_{\Sigma} + \sum_{i=1}^k \frac{\Delta C_i}{r_i} \cdot \ln[1 + \exp(r_i(x - x_{ci}))], \quad (3)$$

где C_{Σ} — постоянная, являющаяся суммой постоянных от интегрирования отдельных слагаемых из (2). Параметры, входящие в выражение, стоящее под знаком суммы в [3] удобно для анализа систематизировать в виде «матрицы параметров» следующим образом:

$$M_{p\beta} = \begin{pmatrix} \Delta C_1 & \Delta C_2 & \dots & \Delta C_i & \dots & \Delta C_k \\ r_1 & r_2 & \dots & r_i & \dots & r_k \\ x_{c1} & x_{c2} & \dots & x_{ci} & \dots & x_{ck} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

следует отметить, что резкость перехода определяется из соотношения:

$$r_i \approx \frac{\pi^2}{\Delta x_i}, \quad (5)$$

где Δx_i — ширина области перехода функции, стоящей под знаком суммы в правой части (2). В случае исследования двух и более объектов, для множеств параметров, находящихся в строках (4) определяются средние значения и показатели вариации, позволяющие детальнее оценить, проанализировать и сравнить рассматриваемые явления.

Функция (3) использована для аппроксимации экспериментальных точек в границах данной работы. Для реализации аппроксимации осуществлялись следующие действия:

1. в результате детального рассмотрения экспериментальных точек выделяются области, которые аппроксимируются линейными функциями, с учётом специфики рассматриваемого физического явления;
2. последовательно выявляются абсциссы и ординаты экспериментальных точек $(x_{ci}, g(x_{ci}))$, в которых одна линейная функция сменяется другой линейной функцией;
3. посредством использования метода наименьших квадратов реализуется аппроксимация k выделенных участков линейными функциями, которые приводятся к виду:

$$g_n(x) = g(x_{cn}) + (x - x_{cn}) \sum_{i=1}^n \Delta C_i, \quad n = 1, 2, \dots, k$$

в результате чего определяются коэффициенты ΔC_i ;

4. функция $\tilde{\beta}_\Sigma(x)$ стремится к «ломаной» линии при $r_i \rightarrow \infty$, а сами параметры r_i выбираются из условия:

$$\left| \tilde{\beta}_\Sigma(x) - g_n(x) \right| < \varepsilon_n,$$

в малой δ -окрестности x_{cn} , при этом ε_n подбирается также и с учётом механизмов изучаемых процессов;

5. постоянные C и C_Σ находятся при аппроксимации начального нулевого линейного участка методом наименьших квадратов.
6. выявленные параметры подставляются в (3), в результате чего определяется аналитическое и последующее графическое представление результатов экспериментального исследования.

Известно, что состояние сверхпластичности у быстрорежущих сталей, полученных способом традиционного металлургического передела, впервые было обнаружено А.П. Гуляевым и Л.М. Сармановой при кручении в изотермических условиях при температурах, близких к температурам диффузионных фазовых превращений [1, 5]. Было установлено, что в быстрорежущих сталях не происходит монотонного повышения пластичности при увеличении температуры, а наблюдается ее резкое изменение, обусловленное наличием фазовых превращений в частности в стали Р18. На рис. 1 приведены экспериментальные точки, полученные А.П. Гуляевым, дискретно выражающие зависимость пластичности стали Р18 от температуры.

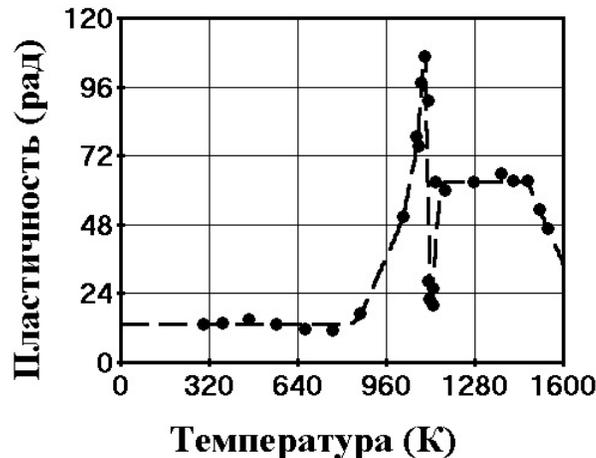


Рис. 1: Зависимость пластичности стали Р18 от температуры при кручении.

При анализе данных А.П. Гуляева по пластичности было выделено $k = 7$ областей, которые аппроксимируются линейными функциями. В результате реализации описанных выше действий 1 – 6 установлено, что экспериментальные точки хорошо аппроксимируются следующей сложной функцией (пунктирная линия на рис. 1):

$$\begin{aligned} \varphi(T) = 2\pi[& 2,1 + 0,34 \ln(1 + \exp(0,1(T - 850))) + 0,45 \ln(1 + \exp(0,1(T - 1020))) + \\ & + 0,4 \ln(1 + \exp(0,34(T - 1072))) - 1,6 \ln(1 + \exp(0,7(T - 1100))) + \\ & + 1,6 \ln(1 + \exp(0,7(T - 1117,5))) - 1,075 \ln(1 + \exp(0,2(T - 1154))) - \\ & - 0,05 \ln(1 + \exp(0,7(T - 1470)))], \end{aligned} \quad (6)$$

где φ — параметр, выражающий пластичность, в радианах (в случае отсутствия множителя 2π пластичность измеряется в оборотах), T — термодинамическая температура.

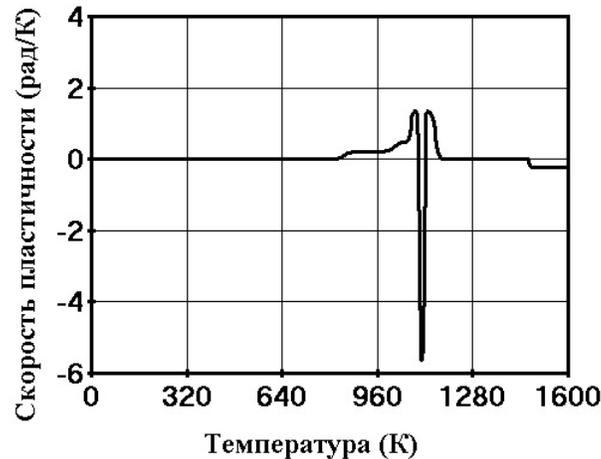


Рис. 2: Зависимость «скорости» изменения пластичности стали Р18 относительно роста температуры.

Дифференцируя функцию (2) получим зависимость «скорости» изменения пластичности относительно роста температуры. График данной зависимости приведён на рис. 2. Полученная после дифференцирования (2) зависимость имеет следующий вид:

$$\frac{d\varphi(T)}{dT} = 2\pi \left[\frac{0,034}{1 + \exp(-0,1(T - 850))} + \frac{0,045}{1 + \exp(-0,1(T - 1020))} + \frac{0,136}{1 + \exp(-0,34(T - 1072))} - \frac{1,12}{1 + \exp(-0,7(T - 1100))} + \frac{1,12}{1 + \exp(-0,7(T - 1117,5))} - \frac{0,215}{1 - \exp(-0,2(T - 1154))} - \frac{0,035}{1 + \exp(-0,7(T - 1470))} \right]. \quad (7)$$

В случае отсутствия множителя 2π в (7) скорость изменения пластичности измеряется в оборотах, делённых на кельвин. Рисунок 2 очень хорошо иллюстрирует скачкообразное изменение пластичности в случае перехода стали Р18 в состояние сверхпластичности.

Как видно из рис. 2 производная обращается в ноль в двух точках участка графика, описывающего состояние сверхпластичности (1098К; 108 рад) и (1119,7К; 18,5 рад).

Из рис. 1 следует, что до температуры 825К ($\approx 550^\circ C$) пластичность, которая характеризуется углом φ , не изменяется. Соответственно скорость её изменения относительно роста температуры равна 0 рад/К (рис. 2). После температуры 825К, кривая пластичности идет резко вверх и при температуре 1098К ($\approx 825^\circ C$) достигает максимума, при этом угол поворота до разрушения составляет 108,23 рад (≈ 17 оборотов). Это в ≈ 8 раз больше, чем при температурах до 825К. Это явление и характеризуется как сверхпластичность быстрорежущей стали Р18 [36]. Сопоставление температуры максимума пластичности с температурой начала превращения эвтектоида в аустенит свидетельствует о том, что максимум пластичности совпадает с самой высокой температурой существования легированного феррита (α -фазы) [1].

С началом образования аустенита пластичность резко снижается и к моменту завершения α - γ -превращения 1133К ($860^\circ C$) она составляет ≈ 19 рад. При повышении температуры более 1133К пластичность стали Р18 снова возрастает (угол поворота до разрушения достигает 20 рад или 10 оборотов), в интервале температур 1173...1473К ($900...1200^\circ C$) остается постоянной, а затем снижается. Таким образом, по данным автора [5], приведенная температурная зависимость пластичности быстрорежущей стали Р18 совершенно четко показывает явление СП вблизи критической точки A_{c1} (соответствующей превращению перлита в аустенит и началу перекристаллизации) и резкое снижение его при фазовом превращении.

Зависимость крутящего момента, действующего на образец из стали Р18 от термодинамической температуры в виде экспериментальных точек по данным А.П. Гуляева показана на рис. 3.

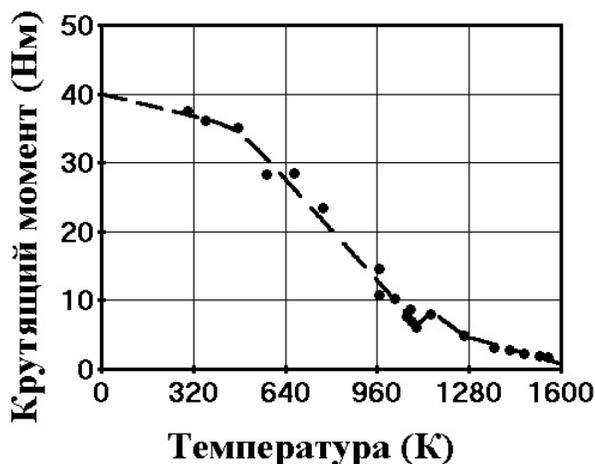


Рис. 3: Зависимость крутящего момента от температуры для стали Р18.

При анализе данных А.П. Гуляева по крутящему моменту было выделено $k = 4$ области, которые аппроксимируются линейными функциями. В результате реализации описанных выше действий 1 – 6 установлено, что экспериментальные точки хорошо аппроксимируются следующей функцией (пунктирная линия на рис. (3)):

$$M_{tor}(T) = 40 - 0,01T - 1,2 \ln(1 + \exp(0,03(T - 473))) + 0,45 \ln(1 + \exp(0,2(T - 1100))) - 0,76 \ln(1 + \exp(0,1(T - 1147))) + 0,25 \ln(1 + \exp(0,08(T - 1260))), \quad (8)$$

где M_{tor} – крутящий момент, параметр, характеризующий прочность (сопротивление деформации) образца из стали Р18.

Как отмечено выше, до температуры 825К пластичность, не изменяется, а сопротивление деформации, оцениваемое крутящим моментом M_{tor} , снижается. Прочность уменьшается и при резком росте пластичности, однако отмечается аномалия и в ее свойствах [1, 5]: крутящий момент монотонно снижается по мере повышения температуры и только в области температур превращения наблюдается некоторое его повышение с последующим снижением.

В результате оцифровки полученных графиков функций (рис. 1 и рис. 3) с шагом 10К установлена зависимость параметра пластичности φ от крутящего момента M_{tor} при неизотермических условиях (рис. 4).

Зависимость, показанная на рис. 4, аппроксимируется следующей функцией (сплошная линия на рис. 4):

$$\varphi(M_{tor}) = 18,1M_{tor} + 20 - 1,207 \ln(1 + \exp(15(M_{tor} - 2,36))) - 0,627 \ln(1 + \exp(15(M_{tor} - 8,95))) + 0,32 \ln(1 + \exp(15(M_{tor} - 10,56))) + 1,53 \ln(1 + \exp(3(M_{tor} - 18,1))), \quad M_{tor} > 0. \quad (9)$$

График функции (9) отлично проходит через экспериментальные точки, за исключением отрезка значений крутящего момента [5, 6, 7, 8] длиной всего 2,2 Нм. Только на данном отрезке наблюдается большой разброс значений параметра пластичности от 18,5 до 108 радиан (пунктирная линия на рис. 4). Именно при данных диапазонах значений параметров было определено состояние сверхпластичности.



Рис. 4: Зависимость пластичности стали Р18 от крутящего момента в неизотермических условиях.

Как отмечено выше, при получении заготовок металлорежущего инструмента из стали Р18 особое место занимают методы, связанные с использованием состояния сверхпластичности и повышенной пластичности [1]. С другой стороны, явление трения и износа готового инструмента связано с возникновением данных состояний в локальных участках фактической площади контакта с обрабатываемой деталью.

Известно, что фактическая площадь контакта в общем виде определяется из соотношения [37]:

$$A_r = \frac{A_a \cdot p_a}{c_T \cdot \sigma_T}, \quad (10)$$

где A_r — фактическая площадь контакта, A_a — номинальная площадь контакта, p_a — номинальное давление, $A_a p_a = P_N$ — нормальная сила, прижимающая контактирующие тела друг к другу, c_T — безразмерный коэффициент, σ_T — предел текучести. Фактическое давление в общем случае определяется по формуле:

$$p_r = c_T \cdot \sigma_T. \quad (11)$$

Соответственно фактическое давление прямо пропорционально пределу текучести и при его инвариантности оно остаётся постоянным, на что указывается также в работах Н.Б. Демкина и Д. Мура [42, 43]. Согласно обширным экспериментальным и теоретическим исследованиям Хохлова В.М. [37, 38, 39, 40, 41], базирующихся на результатах широкого круга авторов, коэффициент $2 < c_T < 2,139$. Эти данные соответствуют выводам работы Петрусевича А.И. [44], где установлено, что напряжения на микронеровностях практически всегда будут иметь величину, превышающую предел текучести материала. В работе академика Ишлинского А.Ю. [45] показано, что для перевода сферического выступа от упругой деформации к пластической необходимо на площадке контакта создать напряжения не менее утроенного предела текучести. По данным Боудена Ф.П. и Тabora Д. [46] необходимо создать напряжение такой же величины для перевода в пластическое состояние неровностей с углами при вершине близкими к 180° . Таким образом, можно предположить, что коэффициент c_T является переменным и изменяется в пределах от 2 до 3. Для одного и того же материала может изменяться и предел текучести.

Из материаловедения известно, что предел текучести закалённых сталей изменяется при отпуске. Зависимость предела текучести стали Р18 от температуры отпуска в виде экспериментальных точек по данным В.Н. Виноградова и Г.М. Сорокина [2] показана на рис. 5.

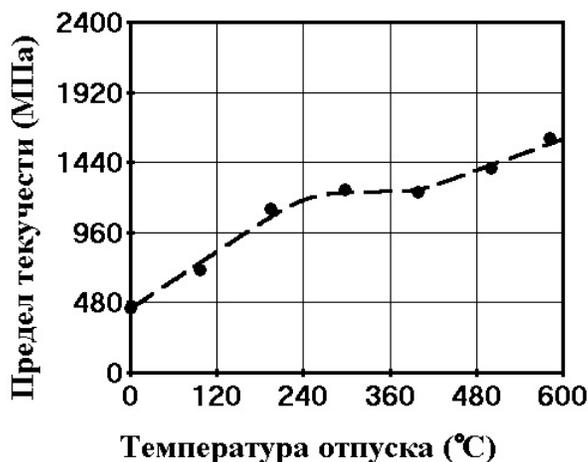


Рис. 5: Зависимость предела текучести стали Р18 от температуры отпуска.

При анализе данных по пределу текучести было выделено $k = 2$ области, которые аппроксимируются линейными функциями. Зависимость, показанная на рис. 5, аппроксимируется следующей функцией:

$$\sigma_{0,2}(T) = 440 + 3,25t_t - 64 \ln(1 + \exp(0,05(t_t - 245))) + 17,3 \ln(1 + \exp(0,1(t_t - 400))), \quad (12)$$

где $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести, t_t — температура отпуска.

Результаты многих исследований показывают зависимость предела текучести различных материалов от температур, при которых проводились механические испытания [47, 48, 49, 50, 51]. Приведённые данные подтверждают высокую структурную чувствительность стали Р18 к тепловому воздействию [2]. Такие сильные изменения предела текучести Р18 могут вызвать соответствующие изменения её износостойкости в условиях эксплуатации, когда режимы работы постоянно изменяются, а контролировать их не всегда возможно.

Зависимость износостойкости стали Р18 от температуры отпуска в виде экспериментальных точек по данным В.Н. Виноградова и Г.М. Сорокина показана на рис. 6.

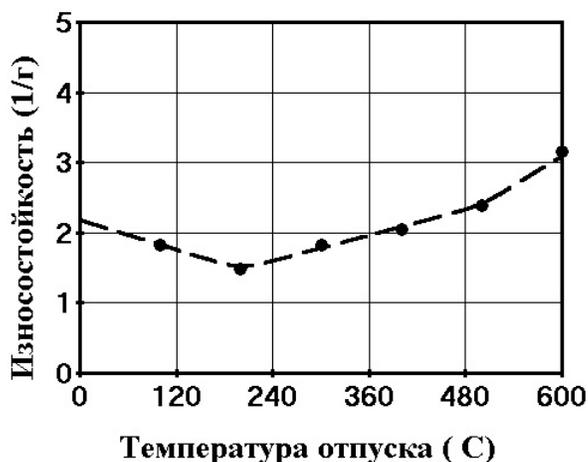


Рис. 6: Зависимость износостойкости стали Р18 от температуры отпуска.

При анализе данных В.Н. Виноградова и Г.М. Сорокина по износостойкости также было выделено $k = 2$ области, которые аппроксимируются линейными функциями. Зависимость,

показанная на рис. 6, аппроксимируется следующей функцией:

$$I_m(t_t) = 2,18 - 0,0035t_t + 0,0654 \ln(1 + \exp(0,1(t_t - 200))) + 0,04 \ln(1 + \exp(0,1(t_t - 500))), \quad (13)$$

где I_m — износостойкость по массе.

Соответственно прогнозировать постоянство механических свойств можно только в случае, когда заранее известны колебания температуры в зоне трения при изнашивании; это весьма существенная причина различия значений износостойкости, полученных при испытаниях одной и той же стали разными экспериментаторами при разных режимах нагружения [2]. Из полученных данных следует, что с повышением температуры отпуска износостойкость стали Р18 карбидного класса вначале снижается а затем повышается (в отличие от ряда сталей перлитного класса). Природа самоупрочнения сталей типа Р18 хорошо известна и обусловлена образованием вторичной твёрдости при отпуске в результате превращения остаточного аустенита в мартенсит [2].

В результате оцифровки полученных графиков функций (рис. 5 и рис. 6) с шагом $10^\circ C$ установлена зависимость износостойкости стали Р18 от её условного предела текучести при соответствующих температурах отпуска (рис. 7).

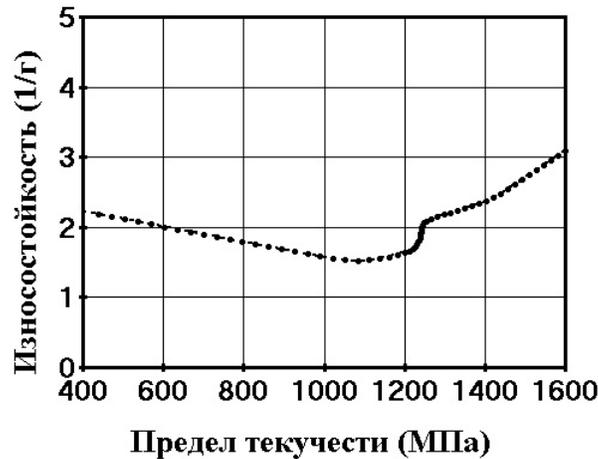


Рис. 7: Зависимость износостойкости стали Р18 по её предела текучести, полученного при отпуске.

Зависимость, показанная на рис. 7, отлично аппроксимируется следующей функцией при $k = 4$:

$$I_m(\sigma_{0,2}) = 2,67 - 0,0011\sigma_{0,2} + 0,1 \ln(1 + \exp(0,03(\sigma_{0,2} - 1104))) + \\ + 0,0967 \ln(1 + \exp(0,3(\sigma_{0,2} - 1234))) - 0,0967 \ln(1 + \exp(0,3(\sigma_{0,2} - 1246))) + \\ + 0,00643 \ln(1 + \exp(0,3(\sigma_{0,2} - 1421))). \quad (14)$$

Исследование функции (14) показывает, что износостойкость практически линейно уменьшается от $2,23 \text{ г}^{-1}$ до минимального значения $1,52 \text{ г}^{-1}$, соответствующего условному пределу текучести $\approx 1086 \text{ МПа}$. Далее следует небольшой линейный рост до значения $\approx 1,7 \text{ г}^{-1}$, после чего происходит резкий сигмоидальный скачок до значения $\approx 2,1 \text{ г}^{-1}$. Далее следуют ещё два линейных участка повышения износостойкости, обусловленные образованием вторичной твёрдости.

В процессе сухого трения двух твёрдых тел разогрев границы раздела в точках фактической площади контакта A_g может достигать весьма высоких значений (до $1000^\circ C$ и более) [52]. Даже в условиях эффективной смазки контактирующие поверхности иногда нагреваются

до 600°C . Столь значительный разогрев может вызвать существенные изменения структуры и свойств поверхностных слоёв, например, их рекристаллизацию. Рекристаллизация сопровождается изменением размера зерна материала и релаксацией напряжений в твёрдом теле. Оба фактора влияют на механические свойства, трение и износ материала. Соответственно зависимость, представленная на рис. 7, отражает влияние исходных значений условного предела текучести на износостойкость образцов из стали Р18. При любом виде фрикционного взаимодействия материалов происходит деформация поверхностных слоёв. Степень деформации зависит от ряда параметров [52]: скорости, нагрузки, геометрии поверхностей, температуры и др. Поверхностный слой поликристаллического материала содержит участки различной ориентации, поэтому даже при равенстве всех внешних параметров деформация отдельных кристаллов оказывается различной и поверхности трения заведомо характеризуются неоднородностью деформированного состояния. Неравномерность деформации и, соответственно, энергии, запасённой отдельными зёрнами, приводит к неравновесному состоянию поверхности трения, что сказывается на кинетике поверхностных процессов, например, на рекристаллизации. Чем больше накопленная при деформации энергия, тем ниже температура рекристаллизации.

Следовательно, сильно деформированные зёрна могут выступать центрами рекристаллизации и способствовать развитию процесса в смежных областях фактического контакта. Процесс трения вызывает не только деформацию поверхностных зёрен, но и изменение их ориентации, то есть поверхность приспособляется к действующей схеме механических напряжений. Рекристаллизация стимулируется постоянной деформацией решётки при трении в сочетании с температурными всплесками на пятнах фактического контакта и интегральным нагревом поверхностей трения. В указанных условиях превалирующим оказывается процесс измельчения зерна. Он может идти до кажущейся потери кристаллического строения.

Внешнее силовое воздействие вызывает изменение состояния и микроструктуры поверхностных слоёв и отражается на конечном износе. Существенное развитие деформационных процессов на поверхностях трения реализуется при абразивном изнашивании. В работе [2] приведены результаты испытаний на абразивное изнашивание стали Р18 при трении по шлифовальному кругу марки 39А40 СТ со скоростью скольжения 2,47 м/с и подачей в зону трения смазочно-охлаждающей эмульсии при различном номинальном контактном давлении.

Зависимость износа стали Р18 от номинального контактного давления в виде экспериментальных точек по данным работы [2] показана на рис. 8.



Рис. 8: Зависимость износа стали Р18 от номинального контактного давления.

При анализе данных работы [2] по износу было выделено $k = 3$ области, которые аппроксимируются линейными функциями. Зависимость, показанная на рис. 8, аппроксимируется

следующей функцией:

$$\Delta m(p_a) = 0,0047p_a + 0,014 \ln(1 + \exp(0,5(p_a - 81))) - \\ - 0,0114 \ln(1 + \exp(0,5(p_a - 117))) + 0,1466 \ln(1 + \exp(0,5(p_a - 146))), \quad (15)$$

где Δm — массовый износ, p_a — номинальное давление.

При абразивном изнашивании стали Р18 в диапазоне номинального давления от 0 до 175 МПа было выделено три этапа. При переходе от одного этапа к другому происходило увеличение интенсивности изнашивания, на третьем этапе влияние нагрузки на износ проявлялось наиболее существенно. Большая удельная нагрузка на поверхность трения приводит к переходу абразивного в тепловое изнашивание. Продукты изнашивания стали Р18 на первом этапе — порошок светло-серого цвета, на втором и третьем — тёмно-синего, наблюдалось искробразование. Поверхности образцов имели следы микро-резания, царапания и вдавливания, это подтверждает справедливость соотношений (10) и (11) для фактической площади контакта и фактического давления, превышающего условный предел текучести, полученный при отпуске, а также изменяющийся в процессе рекристаллизации. С другой стороны, тепловое изнашивание, начинающееся при высоком номинальном давлении, характеризовалось наличием оплавленного пятна тёмно-синего цвета с образованием на кромке образца наплыва металла. Это говорит о наличии высоких температур в зоне трения, аналогичных температурам, при которых проявляется повышенная пластичность и сверхпластичность стали Р18 (рис. 1). В настоящее время ещё не установлены и не приняты критерии проявления сверхпластичности при трении и изнашивании. При увеличении нагрузки объём поверхностных слоёв, подверженных деформации в результате нагрева, увеличивается, соответственно происходит резкое приращение износа, подобно резкому росту пластичности при приращении температуры (рис. 1 и рис. 8). Проявление сверхпластической деформации в зоне трения должно также оцениваться и такими характеристиками как сила и коэффициент трения.

Приведённые закономерности имеют огромное значение и могут быть использованы в судебно-экспертной практике при разработке экспертных методик исследования металлов и сплавов.

3. Заключение

На основании проведённых исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработана математическая модель, позволяющая реализовать аппроксимацию результатов экспериментальных, в том числе экспертных, исследований пластичности, прочности и износостойкости материалов с учётом взаимного перехода линейных и нелинейных зависимостей.
2. Установлено, что разработанная математическая модель отлично аппроксимирует результаты испытаний образцов из стали Р18 на пластичность, прочность и износостойкость с различной сложностью расположения экспериментальных точек.
3. Показано, что посредством использования разработанной модели появляется возможность более детального анализа результатов экспериментальных исследований в области теории пластического формоизменения и трибологии.
4. Выявлено, что результаты экспериментальных исследований пластичности, прочности и износостойкости стали Р18 могут быть аппроксимированы функциями одного вида.
5. Указано на взаимосвязь состояния сверхпластичности с износостойкостью сталей, на примере стали Р18.

6. Показано место разработанных математических моделей в системе судебной металловедческой экспертизы.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гвоздев А. Е., Черных Д. П., Бреки А. Д., Моисеев В. В., Стариков Н. Е., Пустовгар А. С., Аверьянов Р. В. Сверхпластичность сталей ледебуритного класса. – Тула: Издательство Тульского государственного университета. 2006. – 75 с.
2. Виноградов В. Н., Сорокин Г. М. Износостойкость сталей и сплавов. – М.: Нефть и газ, 1994. – 417 с.
3. Чумаченко Е. Н., Цепин М. А., Чекин А. В., Панина О. Н. Анализ влияния структуры на формоизменение заготовки при листовой сверхпластической формовке // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – №7. – С. 3–7.
4. Еникеев Ф. У. Определение параметров сигмоидальной кривой сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – №4. – С. 18–22.
5. Гуляев А. П. Технологическая пластичность быстрорежущих сталей / А. П. Гуляев, Л. М. Сарманова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1969. – №7. – С. 2–9.
6. Бреки А. Д., Гвоздев А. Е., Колмаков А. Г. Полуэмпирические математические модели трения верчения стали ШХ15 по стали Р6М5, по схеме шар – плоскость с учетом износа // Материаловедение. – 2019. – № 2. – С. 43–48.
7. Чулкин С. Г., Стешенков А. Л., Бреки А. Д., Лысенков П. М. Математическое моделирование процесса обкатки гребных валов // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1–3 (43). – С. 76–86.
8. Бреки А. Д. О функциональном контуре конечного треугольного массива чисел / В сборнике: Алгебра, теория чисел и дискретная геометрия: современные проблемы и приложения Материалы XV Международной конференции, посвященной столетию со дня рождения профессора Николая Михайловича Коробова. – 2018. – С. 166–169.
9. Бреки А. Д., Александров С. Е., Тюриков К. С., Колмаков А. Г., Гвоздев А. Е., Калинин А. А. Антифрикционные свойства плазмохимических покрытий на основе SiO_2 с наночастицами MoS_2 в условиях трения верчения по стали ШХ15 // Материаловедение. – 2018. – №1. – С. 31–35.
10. Breki A. D., Medvedeva V. V., Krylov N. A., Aleksandrov S. E., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E., Sergeev N. N., Provotorov D. A., Fadin Y. A. Antiwear properties of composite greases «LITOL-24–magnesium hydrosilicate particles» // Inorganic Materials: Applied Research. 2018. Т. 9. № 1. P. 21–25.
11. Бреки А. Д., Гвоздев А. Е., Колмаков А. Г., Сергеев Н. Н. Исследование трения верчения стали ШХ15 по сталям Р6М5 и 10Р6М5-МП с использованием математического моделирования // Материаловедение. – 2018. – №12. – С. 40–45.
12. Koltsova T. S., Breki A. D., Larionova T. V., Tolochko O. V. Operational characteristics of the composite aluminum – carbon nanofibers // Materials Physics and Mechanics. 2018. Т.38. №1. P. 11–15.

13. Breki A., Nosonovsky M. Ultraslow frictional sliding and the stick-slip transition // *Applied Physics Letters*. 2018. Т. 113. № 24. P. 241602.
14. Breki A., Nosonovsky M. Einstein's viscosity equation for nanolubricated friction // *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*. 2018. Т. 34. № 43. P. 12968-12973.
15. Бреки А. Д., Семенов С. А., Стариков Н. Е., Гвоздев А. Е., Лаврушин А. В. Влияние микроскопических грибов *aspergillus niger* на триботехнические свойства пластичного смазочного материала марки «ЛИТА» // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2018. – №7. – С. 108–117.
16. Чечулин К. Н., Бреки А. Д., Молоков И. Е., Гвоздев А. Е., Кутепов С. Н., Пантюхин О. В. Влияние изменения пригодности моторного масла М-8ДМ в двигателе внутреннего сгорания Д-245.7ЕЗ автомобиля ГАЗ-3309 на циклы его поставки в границах технического обеспечения // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2018. – №7. – С. 137–150.
17. Бреки А. Д., Гвоздев А. Е., Минаев И. В., Кутепов С. Н., Калинин А. А. Математические модели характеристик процесса фрикционного взаимодействия гетерофазных металлических систем // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2018. – №7. – С. 39–53.
18. Чечулин К. Н., Бреки А. Д., Молоков И. Е., Гвоздев А. Е., Кутепов С. Н., Пантюхин О. В. Влияние изменения свойств моторного масла М10Г2К в двигателе внутреннего сгорания ЯМЗ-236 автомобиля УРАЛ-4320 на циклы его поставки в границах технического обеспечения // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018. – №8. – С. 127–140.
19. Чечулин К. Н., Бреки А. Д., Молоков И. Е., Гвоздев А. Е., Кутепов С. Н., Пантюхин О. В. Влияние диагностики моторного масла М10Г2К в двигателе внутреннего сгорания КАМАЗ-740 автомобиля КАМАЗ на циклы его поставки в границах технического обеспечения // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2018. – №8. – С. 79–93.
20. Бреки А. Д., Тюрикова И. А., Шатульский А. А., Гвоздев А. Е., Кутепов С. Н. Влияние магнитных наночастиц Fe₃O₄ на трение и износ стали 10X17H13M2T в режиме верчения в среде смазочного масла // *Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева*. – 2018. – №4 (47). – С. 103–111.
21. Breki A. D., Kol'tsova T. S., Skvortsova A. N., Tolochko O. V., Aleksandrov S. E., Kolmakov A. G., Lisenkov A. A., Fadin Y. A., Gvozdev A. E., Provotorov D. A. Tribotechnical properties of composite material «aluminum-carbon nanofibers» under friction on steels 12KH1 and SHKH15 // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Т. 9. № 4. P. 639–643.
22. Breki A. D., Aleksandrov S. E., Tyurikov K. S., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E., Kalinin A. A. Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO₂ with MoS₂ nanoparticles under conditions of spinning friction on SHKH15 steel // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2018. Т. 9. № 4. P. 714–718.
23. Stankevich P., Mironovs V., Vasilyeva E., Breki A., Tolochko O. The possibility of modifying the elements of the bearing assembly with nanoparticles in order to reduce the friction coefficient // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2017. P. 012084.

24. Alexandrov S. E., Tyurikov K. S., Breki A. D. Low-temperature plasma-chemical deposition of nanocomposite antifriction molybdenum disulfide (filler)–silicon oxide (matrix) coatings // Russian Journal of Applied Chemistry. 2017. Т. 90. №11. Р. 1753–1759.
25. Бреки А. Д., Кольцова Т. С., Скворцова А. Н., Толочко О. В., Александров С. Е., Колмаков А. Г., Лисенков А. А., Гвоздев А. Е., Фадин Ю. А., Провоторов Д. А. Триботехнические свойства композиционного материала «алюминий-углеродные нановолокна» при трении по сталям 12Х1 и ШХ15 // Материаловедение. – 2017. – №11. – С. 37–42.
26. Бреки А. Д., Медведева В. В., Крылов Н. А., Колмаков А. Г., Фадин Ю. А., Гвоздев А. Е., Сергеев Н. Н., Александров С. Е., Провоторов Д. А. Противоизносные свойства пластичных смазочных композиционных материалов «ЛИТОЛ24-частицы гидросиликатов магния» // Материаловедение. – 2017. – №3. – С. 38–42.
27. Бреки А. Д., Александров С. Е., Тюриков К. С., Гвоздев А. Е., Калинин А. А. Антифрикционные свойства покрытия на основе SiO_2 , содержащего наночастицы MoS_2 со средним размером 61 нм при трении по стали ШХ15 // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – №7. С. 334–343.
28. Бреки А. Д., Александров С. Е., Тюриков К. С., Гвоздев А. Е., Калинин А. А. Исследование трения стали ШХ15 по покрытию на основе SiO_2 , содержащего наночастицы дисульфида молибдена со средним размером 53 нм // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – №7. – С. 363–373.
29. Бреки А. Д., Александров С. Е., Тюриков К. С., Гвоздев А. Е., Агеев Е. В., Провоторов Д. А., Куц В. В. Лабораторные исследования трения стали ШХ15 по покрытию на основе SiO_2 , содержащему наночастицы MoS_2 со средним размером 64 нм // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2017. – №4 (73). – С. 52–67.
30. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G., Starikov N. ., Provotorov D. A., Sergeyev N. N., Khonelidze D. M. On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. Р. 126–129.
31. Breki A. D., Didenko A. L., Kudryavtsev V. V., Vasilyeva E. S., Tolochko O. V., Kolmakov A. G., Gvozdev A. E., Provotorov D. A., Starikov N. E., Fadin Yu. A. Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. Р. 32–36.
32. Breki A. D., Didenko A. L., Kudryavtsev V. V., Vasilyeva E. S., Tolochko O. V., Gvozdev A. E., Sergeyev N. N., Provotorov D. A., Starikov N. E., Fadin Yu. A., Kolmakov A. G. Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS_2 nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 1. Р. 56–59.
33. Breki A. D., Gvozdev A. E., Kolmakov A. G. Application of generalized pascal triangle for description of oscillations of friction forces // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Т. 8. № 4. Р. 509–514.
34. Бреки А. Д., Александров С. Е., Тюриков К. С., Гвоздев А. Е., Калинин А. А., Агеев Е. В., Ивахненко А. Г. Закономерности трения верчения стали ШХ15 по поверхности покрытия на основе SiO_2 , содержащего наночастицы MoS_2 со средним размером 70 нм, нанесённого на подложку из стали 12Х18Н10Т // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – №3 (24). – С. 48–59.

35. Breki A. D., Vasilyeva E. S., Tolochko O. V., Didenko A. L., Kudryavtsev V. V., Kolmakov A. G., Sergeyev N. N., Gvozdev A. E., Starikov N. E., Provotorov D. A., Fadin Y. A. Synthesis and tribotechnical properties of composite coatings with PM-DADPE polyimide matrix and fillers of tungsten dichalcogenide nanoparticles upon dry sliding friction // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Т. 7. №4. P. 542–546.
36. Ondracek G. Zum Zussaommenhang zwischen Eigenschaften und Gefugestruktur mehrphasiger Werkstoffe // *Werkstofftechnik*. 1977. №8. P. 240–246
37. Хохлов В. М. Расчёт площадей контакта, допускаемых напряжений, износа и износостойких деталей машин: Монография. – Брянск, БГТУ, 1999. – 104 с.
38. Хохлов В. М. Основы расчёта контурных и фактических площадей контакта и давлений // *Вестник машиностроения*. – 1990. – №7. – С. 21–22.
39. Хохлов В. М. Расчёт контурных площадей контакта и давлений // *Известия вузов. Машиностроение*. – 1990. – №4. – С. 20–24.
40. Khokhlov V. M. Foundations underlying the calculation of contour and actual contact areas and pressures // *Russian Engineering Research*. 1990. Vol.10. №7. P. 15–18.
41. Khokhlov V. M. Calculation of contour and nominal working stresses // *Russian Engineering Research*. 1994. Vol.14. №4. P. 1–4.
42. Демкин Н. Б. Исследование контакта двух шероховатых поверхностей // *Трение и износ*. – 1990. – Т.11. – №6. – С. 1002–1006.
43. Мур Д. Основы и применения трибоники. – М.: Мир, 1978. – 488 с.
44. Петрусеви́ч А. И. Основные выводы из контактно-гидродинамической теории смазки. – М.: АН СССР, ОТН, 1951, №2. – С. 209–223.
45. Ишлинский А. Ю. Осесимметричная задача теории пластичности и проба Бринелля // *Прикладная математика и механика*. – 1944. – Т.8. – Вып.3. – С. 201–224.
46. Bowden F. P., Tabor D. *Reibung und Schmierung fester Korper*. Berlin-Gottingen-Heidelberg: Springer – Verlag, 1959. 410 p.
47. Петров Ю. В., Груздков А. А., Ситникова Е. В. Аномальное поведение предела текучести при повышении температуры в условиях высокоскоростного деформирования // *Доклады Академии наук*. – 2007. – Т. 417. – №4. – С. 493–496.
48. Янушкевич Ж. Ч., Луговская А. С., Беляков А. Н., Добаткин С. В., Кайбышев Р. О. Влияние температуры испытания на предел текучести аустенитных коррозионноустойчивых сталей, подвергнутых прокатке при различных температурах // В сборнике: VI Всероссийская конференция по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи Сборник материалов. – 2016. – С. 320–321.
49. Табачникова Е. Д., Бенгус В. З., Подольский А. В., Смирнов С. Н., Валиев Р. З. Предел текучести и пластичность наноструктурного титана разной чистоты при температурах 300, 77 и 4.2 К // *Кристаллография*. – 2009. – Т.54. – №6. – С. 1119–1122.
50. Александров С. Е., Лямина Е. А., Новожилова О. В. Влияние зависимости предела текучести от температуры на напряженное состояние в тонком полом диске // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2013. – №3. – С. 43–48.

51. Ситников И. В., Саломатова Е. С. Численное моделирование сварки трением с перемешиванием // *Master's Journal*. – 2014. – №2. – С. 84–88.
52. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. А.В. Белого, Н.К. Мышкина; Под ред. А.И. Свириденка. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с.

REFERENCES

1. Gvozdev A.E., Chernykh D.P., Breki A.D., Moiseev V.V., Starikov N.E., Pustovgar A.S., Averyanov R.V. 2006, *Superplasticity of ledeburite-class steels*. Tula, Tula state University Press, 75 p.
2. Vinogradov V.N., Sorokin G.M. 1994, *Wear Resistance of steels and alloys*. Moscow, Oil and gas, 417 p.
3. Chumachenko E.N., Tsepin M.A., Chekin A.V., Panina O.N. 2001, «Analysis of the influence of structure on the shaping of the workpiece during sheet superplastic molding», *Forging and stamping production*, No.7, pp. 3–7.
4. Enikeev F.U. 2001, «Determination of the parameters of the sigmoidal superplastic curve», *Forging and stamping production*, No.4, pp. 18–22.
5. Gulyaev A.P. 1969, «Technological plasticity of high-speed steels», *Metal Science and heat treatment of metals*, No.7, pp. 2–9.
6. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. 2019, «Semiempirical mathematical models of the friction of twisting steel SHX15 on steel P6M5, according to the ball – plane scheme with wear», *Material Science*, No.2, pp. 43–48.
7. Chulkin S.G., Steshenkov A.L., Breki A.D., Lysenkov P.M. 2019, «Mathematical modeling of the process of running in propeller shafts», *Marine intelligent technologies*, No.1-3(43), pp. 76–86.
8. Breki A.D. 2018, «On the functional contour of a finite triangular array of numbers», *Algebra, number theory and discrete geometry: modern problems and applications Materials of the XV International conference dedicated to the centenary of the birth of Professor Nikolai Mikhailovich Korobov*, pp. 166–169.
9. Breki A.D., Alexandrov S.E., Tyurikov K.S., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Kalinin A.A. 2018, «Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO₂ with MoS₂ nanoparticles under conditions of torsion friction on steel SHX15», *Material Science*, No.1, pp. 31–35.
10. Breki A.D., Medvedeva V.V., Krylov N.A., Aleksandrov S.E., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A., Fadin Y.A. 2018, «Antiwear properties of composite greases «LITOL-24–magnesium hydrosilicate particles»», *Inorganic Materials: Applied Research*, Vol.9, No.1, pp. 21–25.
11. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Sergeev N.N. 2018, «Investigation of the friction of twisting steel SHX15 on P6M5 and 10R6M5-MP steels using mathematical modeling», *Material Science*, No.12, pp. 40–45.
12. Koltsova T.S., Breki A.D., Larionova T.V., Tolochko O.V. 2018, «Operational characteristics of the composite aluminum–carbon nanofibers», *Materials Physics and Mechanics*, Vol.38, No.1, pp. 11–15.

13. Breki A., Nosonovsky M. 2018, «Ultraslow frictional sliding and the stick-slip transition», *Applied Physics Letters*, Vol.113, No.24, pp. 241602.
14. Breki A., Nosonovsky M. 2018, «Einstein's viscosity equation for nanolubricated friction», *Langmuir: the ACS journal of surfaces and colloids*, Vol.34, No.43, pp. 12968–12973.
15. Breki A.D., Semenov S.A., Starikov N.E., Gvozdev A.E., Lavrushin A.V. 2018, «Influence of microscopic *Aspergillus niger* fungi on tribotechnical properties of LITA brand plastic lubricant», *Izvestiya Tula state University. Technical science*, No.7, pp. 108–117.
16. Chechulin K.N., Breki A.D., Molokov I.E., Gvozdev A.E., Kutepov S.N., Pantyukhin O.V. 2018, «Influence of changes in the suitability of M-8DM engine oil in the internal combustion engine D-245. 7E3 of the GAZ-3309 car on the cycles of its delivery within the technical support», *Izvestiya Tula state University. Technical science*, No.7, pp. 137–150.
17. Breki A.D., Gvozdev A.E., Minaev I.V., Kutepov S.N., Kalinin A.A. 2018, «Mathematical models of characteristics of the process of friction interaction of heterophase metal systems», *Izvestiya Tula state University. Technical science*, No.7, pp. 39–53.
18. Chechulin K.N., Breki A.D., Molokov I.E., Gvozdev A.E., Kutepov S.N., Pantyukhin O.V. 2018, «Influence of changes in the properties of M10G2K engine oil in the internal combustion engine YAMZ-236 of the URAL-4320 car on the cycles of its delivery within the boundaries of technical support», *Izvestiya Tula state University. Technical science*, No.8, pp. 127–140.
19. Chechulin K.N., Breki A.D., Molokov I.E., Gvozdev A.E., Kutepov S.N., Pantyukhin O.V. 2018, «Influence of diagnostics of M10G2K engine oil in the KAMAZ-740 internal combustion engine on the cycles of its delivery within the boundaries of technical support», *Izvestiya Tula state University. Technical science*, No.8, pp. 79–93.
20. Breki A.D., Tyurikova I.A., Shatul'sky A.A., Gvozdev A.E., Kutepov S.N. 2018, «Influence of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles on friction and wear of 10H17N13M2T steel in the spinning mode in the medium of lubricating oil», *Bulletin of the Rybinsk state aviation technological Academy. P.A. Solov'yov*, No.4(47), pp. 103–111.
21. Breki A.D., Kol'tsova T.S., Skvortsova A.N., Tolochko O.V., Aleksandrov S.E., Kolmakov A.G., Lisenkov A.A., Fadin Y.A., Gvozdev A.E., Provotorov D.A. 2018, «Tribotechnical properties of composite material «aluminum–carbon nanofibers» under friction on steels 12KH1 and SHKH15», *Inorganic Materials: applied research*, Vol.9, No.4, pp. 639–643.
22. Breki A.D., Aleksandrov S.E., Tyurikov K.S., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Kalinin A.A. 2018, «Antifriction properties of plasma-chemical coatings based on SiO₂ with MoS₂ nanoparticles under conditions of spinning friction on SHKH15 steel», *Inorganic Materials: Applied Research*, Vol.9, No.4, pp. 714–718.
23. Stankevich P., Mironovs V., Vasilyeva E., Breki A., Tolochko O. 2017, «The possibility of modifying the elements of the bearing assembly with nanoparticles in order to reduce the friction coefficient», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, pp. 012084.
24. Alexandrov S.E., Tyurikov K.S., Breki A.D. 2017, «Low-temperature plasma-chemical deposition of nanocomposite antifriction molybdenum disulfide (filler)–silicon oxide (matrix) coatings», *Russian Journal of Applied Chemistry*, Vol.90, No.11, pp. 1753–1759.
25. Breki A.D., Koltsova T.S., Skvortsova A.N., Tolochko O.V., Alexandrov S.E., Kolmakov A.G., Lisenkov A.A., Gvozdev A.E., Fadin Yu.A., Provotorov D.A. 2017, «Tribotechnical properties of

- the composite material «aluminum-carbon nanofibers» at friction on steels 12X1 and SHX15», *Material Science*, No.11. pp. 37–42.
26. Breki A.D., Medvedeva V.V., Krylov N.A., Kolmakov A.G., Fadin Yu.A., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Alexandrov S.E., Provotorov D.A. 2017, «Anti-Wear properties of plastic lubricating composite materials «LITHOL24-particles of magnesium hydrosilicates»», *Material Science*, No.3, pp. 38–42.
 27. Breki A.D., Alexandrov S.E., Tyurikov K.S., Gvozdev A.E., Kalinin A.A. 2017, «Antifriction properties of a SiO_2 -based coating containing MoS_2 nanoparticles with an average size of 61 nm when friction occurs on steel SHX15», *Proceedings of the Tula state University. Technical science*, No.7, pp. 334–343.
 28. Breki A.D., Alexandrov S.E., Tyurikov K.S., Gvozdev A.E., Kalinin A.A. 2017, «Investigation of the friction of SHX15 steel on a coating based on SiO_2 containing nanoparticles of molybdenum disulfide with an average size of 53 nm», *Proceedings of the Tula state University. Technical science*, No.7, pp. 363–373.
 29. Breki A.D., Alexandrov S.E., Tyurikov K.S., Gvozdev A.E., Ageev E.V., Provotorov D.A., Kuts V.V. 2017, «Laboratory studies of the friction of SHX15 steel on a SiO_2 -based coating containing MoS_2 nanoparticles with an average size of 64 nm», *Izvestiya Yugo-ZAPADNOGO gosudarstvennogo universiteta*, No.4(73), pp. 52–67.
 30. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G., Starikov N.E., Provotorov D.A., Sergeev N.N., Khonelidze D.M. 2017, «On friction of metallic materials with consideration for superplasticity phenomenon», *Inorganic Materials: Applied Research*, Vol.8, No.1, pp. 126–129.
 31. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Kolmakov A.G., Gvozdev A.E., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A. 2017, «Synthesis and dry sliding behavior of composite coating with (R-OOO)FT polyimide matrix and tungsten disulfide nanoparticle filler», *Organic Materials: Applied Research*, Vol.8, No.1, pp. 32–36.
 32. Breki A.D., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Gvozdev A.E., Sergeev N.N., Provotorov D.A., Starikov N.E., Fadin Yu.A., Kolmakov A.G. 2017, «Composite coatings based on A-OOO polyimide and WS_2 nanoparticles with enhanced dry sliding characteristics», *Organic Materials: Applied Research*, Vol.8, №1, pp. 56–59.
 33. Breki A.D., Gvozdev A.E., Kolmakov A.G. 2017, «Application of generalized pascal triangle for description of oscillations of friction forces», *Inorganic Materials: Applied Research*, Vol.8, No.4, pp. 509–514.
 34. Breki A.D., Alexandrov S.E., Tyurikov K.S., Gvozdev A.E., Kalinin A.A., Ageev E.V., Ivakhnenko A.G. 2017, «Regularities of the friction of twisting steel SHX15 on the surface of a coating based on Si_2 containing MoS_2 nanoparticles with an average size of 70 nm, deposited on a substrate made of steel 12X18N10T», *Izvestiya Yugo-ZAPADNOGO gosudarstvennogo universiteta. Series: Engineering and technology*, No.3(24), pp. 48–59.
 35. Breki A.D., Vasilyeva E.S., Tolochko O.V., Didenko A.L., Kudryavtsev V.V., Kolmakov A.G., Sergeev N.N., Gvozdev A.E., Starikov N.E., Provotorov D.A., Fadin Y.A. 2016, «Synthesis and tribotechnical properties of composite coatings with PM-DADPE polyimide matrix and fillers of tungsten dichalcogenide Nanoparticles upon dry Sliding friction», *Inorganic materials: applied Research*, Vol.7, No.4, pp. 542–546.

36. Ondracek G. 1977, «Zum Zussaammenhang zwischen Eigenschaften und Gefugestruktur mehrphasiger Werkstoffe», *Werkstofftechnik*, No.8, pp. 240–246.
37. Khokhlov V.M. 1999, *Calculation of contact areas, allowable stresses, wear and wear-resistant machine parts*. Bryansk, Belgorod state technological University, 104 p.
38. Khokhlov V.M. 1990, «The basis of the calculation and the actual contour of the areas of contact and pressure», *Vestnik mashinostroeniya*, No.7, pp. 21–22.
39. Khokhlov V.M. 1990, «The calculation of the contour areas of contact and pressure», *Proceedings of the universities. Engineering*, No.4. pp. 20–24.
40. Khokhlov V.M. 1990, «Foundations underlying the calculation of contour and actual contact areas and pressures», *Russian Engineering Research*, Vol.10, No.7, pp. 15–18.
41. Khokhlov V.M. 1994, «Calculation of contour and nominal working stresses», *Russian Engineering Research*, Vol.14, No.4, pp. 1–4.
42. Demkin N.B. 1990, «Investigation of the contact of two rough surfaces», *Friction and wear*, Vol.11, No.6, pp. 1002–1006.
43. Moore D. 1978, *Principles and applications of trebonice*. – Moscow, Mir, 488 p.
44. Petrusevich A.I. 1951, *Main conclusions from the contact-hydrodynamic theory of lubrication*, Moscow, USSR Academy of Sciences, OTN, No.2. pp. 209–223.
45. Ishlinsky A.Yu. 1944, «Axisymmetric problem of plasticity theory and Brinell test», *Applied mathematics and mechanics*, Vol.8, Vol.3, pp. 201–224.
46. Bowden F.P., Tabor D. 1959, *Reibung und Schmierung fester Korper*. Berlin-Gottingen-Heidelberg, Springer-Verlag, 410 p.
47. Petrov Yu.V., Gruzdkov A.A., Sitnikova E.V. 2007, «Anomalous behavior of the yield point when the temperature increases in high-speed deformation», *Reports of the Academy of Sciences*, T.417, No.4. pp. 493–496.
48. Yanushkevich Zh.Ch., Lugovskaya A.S., Belyakov A.N., Dobatkin S.V., Kaibyshev R.O. 2016, «Influence of the test temperature on the yield strength of austenitic corrosion-resistant steels subjected to rolling at different temperatures», *VI all-Russian conference on nanomaterials with elements of a scientific school for young people Collection of materials*, pp. 320–321.
49. Tabachnikova E.D., Bengus V.Z., Podolsky A.V., Smirnov S.N., Valiev R.Z. 2009, «Yield Strength and plasticity of nanostructured titanium of different purity at temperatures of 300, 77 and 4.2 K», *Crystallography*, T.54. No.6. pp. 1119–1122.
50. Alexandrov S.E., Lyamina E.A., Novozhilova O.V. 2013, «Influence of the dependence of the yield point on temperature on the stress state in a thin hollow disk», *Problems of mechanical engineering and machine reliability*, No.3, pp. 43–48.
51. Sitnikov I.V., Salomatova E.S. 2014, «Numerical simulation of friction welding with mixing», *Master's Journal*, No.2, pp. 84–88.
52. Buckley D. 1986, *Surface phenomena in adhesion and frictional interaction*. Moscow, Mashinostroenie, 360 p.

Получено 16.04.2020 г.

Принято в печать 22.10.2020 г.