Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Г. Д. Гуреев, Д. М. Гуреев, Влияние лазерной и лазерно-ультразвуковой обработки на изменение износостойкости поверхностей трения стали, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2007, выпуск 2(), 138–144

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu543>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 54.81.137.203

26 апреля 2023 г., 17:45:12

Физика твёрдого тела

УДК 535:621.373.826]:539

Г. Д. Гуреев, Д. М. Гуреев

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ И ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТОК НА ИЗМЕНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ СТАЛИ

Исследован износ поверхностей трения скольжения конструкционной стали 40Х по нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Из сопоставления процессов изнашивания стали 40Х, взятой в исходном отожжённом состоянии, после её лазерной и лазерно-ультразвуковой закалки до различных значений микротвёрдости поверхности и отдельно после объёмной термообработки установлено, что во всем диапазоне величин микротвёрдости вне зависимости от степени дисперсности структур износ носит усталостный характер. Выявлена тенденция возрастания износостойкости и соответственно уменьшения скорости износа при росте микротвёрдости трущейся поверхности. Из анализа экспериментальных данных получены эмпирические аналитические соотношения, связывающие параметры износа с микродюриметрическими характеристиками поверхности. Показано, что процесс износа сопровождается формированием особого структурно-напряжённого состояния в зоне Сен-Венана, характеризующегося постоянным уровнем твёрдости вне зависимости от предшествующего состояния материала.

Введение. До настоящего времени лазерная обработка отдельно, а также в комбинации с ультразвуковой обработкой поверхностей деталей машин остаётся одной из передовых высокотехнологических операций, лежащих в основе улучшения эксплуатационных характеристик этих деталей машин, и в частности, таких как износостойкость. Результаты работ, посвящённых изучению износостойкости поверхностей, обработанных лазерным излучением, показывают, что поверхности материалов, испытавших фазовые превращения при их термообработке, становятся более износостойкими после лазерной обработки по сравнению с их износостойкостью после традиционной объёмной термообработки [1–8]. Повышение износостойкости, в первую очередь, достигается за счёт большего повышения твёрдости зон лазерного воздействия. Этому также способствует формирующаяся мелкодисперсная структура. Однако, как известно, с повышением твёрдости возрастает хрупкость, что ведёт к особенностям в поведении мелкодисперсной твёрдой структуры при трении. Выявление этих особенностей затрагивает один из центральных вопросов трибологии, связанных с изучением процессов разрушения приповерхностных слоев при фрикционном взаимодействии поверхностей [9]. Если при абразивном износе проблема износостойкости сводится к определению того, насколько устойчивым оказывается материал к микрорезанию, т. е. к определению устойчивости к разрушению границ зёрен, то при трении скольжения процесс изнашивания намного сложнее. Считается, что в основе трения скольжения лежат процессы пластической деформации и разрушения, локализованные в окрестности контакта трущейся пары [10–17].

Целью данной работы явилось сравнительное изучение особенностей изнашивания при сухом трении скольжения поверхностей трения конструкционной стали 40Х, взятой в исходном отожжённом состоянии, после её лазерной и лазерно-ультразвуковой обработок и отдельно после её объёмной термообработки.

Материал, методика и техника эксперимента. В качестве объекта исследования использовалась цилиндрическая поверхность образцов диаметром 50 мм и высотой 12 мм из конструкционной стали 40Х. Образцы брались в исходном отожжённом состоянии, после обработки исследуемой поверхности отдельно лазерным излучением и в комбинации лазерного воздействия с предварительной ультразвуковой обработкой, а также после объёмной термообработки. Объёмная термообработка включала в себя закалку от 850 °С в воду с последующим двухчасовым отпуском при 200 °С.

Лазерная обработка осуществлялась непрерывным СО₂-лазером ЛГН–702 с мощностью излучения 600 Вт. Излучение фокусировалось либо в полосу размером 11 × 1 мм с выровненным распределением плотности мощности по её длине, либо в круглое гауссово пятно диаметром 3 мм. Для увеличения коэффициента поглощения лазерного излучения на обрабатываемую поверхность наносился слой спиртового раствора чёрной типографской краски в 40 мкм. Об-

работка лазерным лучом в форме полосы осуществлялась за один оборот образца. Скорость перемещения луча v при этом составляла от 1,5 до 6,5 мм/с. При обработке круглым пятном лазерный луч перемещался по цилиндрической поверхности образца по винтовой линии. Его линейная скорость перемещения изменялась в пределах от 3 до 12 мм/с. При этом скорость перемещения вдоль оси вращения составляла 0,2 мм/с.

Для предварительной ультразвуковой обработки цилиндрической поверхности образца использовался ультразвуковой генератор УЗГ1–1 с магнитострикционным преобразователем ПМС1–1 и коническим концентратором полуволновой длины с радиусом закругления на конце 2,5 мм. Частота ультразвуковых колебаний составляла 22 кГц, амплитуда — до 45 мкм, мощность — до 1 кВт, усилие прижима концентратора к поверхности образца — 50 Н. Концентратор перемещался по цилиндрической поверхности образца по плотно прилегающим друг к другу (без перекрытия) окружностям со скоростью 1,9 мм/с. Ширина каждого отдельного прохода составляла ~ 1 мм. Последующая лазерная обработка лучом в форме полосы также осуществлялась со скоростью 1,9 мм/с.

Испытания на износ проводились на машине трения 2070 СМТ–1 по схеме диск–колодка при сухом трении. Для уменьшения вероятности образования окислов железа в качестве материала контртела (колодки) была выбрана нержавеющей сталь 12Х18Н10Т с микротвёрдостью 2,1 ГПа, близкой к микротвёрдости отожжённой стали 40Х. Колодка представляла собой сегмент кольца с внутренним диаметром 50 мм, наружным диаметром 70 мм и толщиной 10 мм. Колодка прижималась к диску по цилиндрической поверхности диаметром 50 мм с силой F , равной 10, 20, 30 или 40 Н. Частота вращения диска ν составляла 0,40, 1,33 или 2,17 Гц. Величина износа регистрировалась по изменению веса диска. Взвешивание проводилось на аналитических весах с точностью 5 мг через каждые 500 циклов при испытаниях с частотой вращения 0,40 Гц и через каждые 5000 циклов при испытаниях с частотами вращения 1,33 и 2,17 Гц. Испытания проводились при комнатной температуре ($20 \pm 4^\circ\text{C}$) на воздухе. Влажность колебалась от 60 до 80 %. Параметры испытаний для различных исходных состояний поверхности стали 40Х приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры испытаний для различных исходных состояний
поверхности стали 40Х**

$F, \text{ Н}$	$\nu, \text{ Гц}$	0,40	1,33	2,17
Исходное отожжённое состояние				
10		+	+	+
20		—	—	—
30		—	—	—
40		—	—	—
Лазерная закалка отдельно и с предварительной ультразвуковой обработкой				
10		+	+	+
20		+	—	—
30		+	—	—
40		+	—	—
Объёмная термообработка				
10		+	+	+
20		—	—	—
30		—	—	—
40		—	—	—

Металлографический, дюриметрический, рентгеновский фазовый анализы изнашиваемых поверхностей стали 40Х проводились с помощью оптического микроскопа Neophot–30, микротвердомера ПМТ–3 при нагрузке 0,98 Н, твердомера ТП–7р–1 для измерения твёрдости по Виккерсу при переменных нагрузках 49,03, 98,06, 196,12 и 294,18 Н, дифрактометра Дрон–3 с фильтрованным K_α -излучением кобальта соответственно. При измерении твёрдости по Виккерсу глубина проникновения индентора при постоянном угле между противоположными гранями алмазной пирамидки, равным 136° , определялась по диагонали отпечатка. Измерение остаточных напряжений в поверхностных слоях образцов осуществлялось рентгеновским методом $\sin^2 \psi$ по четырём углам $\psi = 0, 10, 20$ и 30° в диапазоне углов $2\theta = 140 \div 170^\circ$ на переносной пор-

тативной установке Strainflex PSF-2M. Использовался кобальтовый или хромовый источник рентгеновского излучения. Съёмка велась с участков поверхности размером 4×1 мм.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Структура стали 40X в отожжённом состоянии представляет собой феррито-перлитную смесь с микротвёрдостью 2,1 ГПа. После объёмной термообработки сталь 40X имеет бейнитную структуру с отдельными мартенситными участками. Её микротвёрдость при этом достигает 5,4 ГПа. В зонах лазерного и лазерно-ультразвукового воздействий на отожжённую сталь 40X формируется мартенсито-трититная структура. Кроме того, отмечено появление областей метастабильного аустенита с возрастанием их числа при предварительном пластическом деформировании поверхности стали ультразвуком. По мере удаления от поверхности доля мартенсита уменьшается, а доля тростита увеличивается. На периферии зон лазерного и лазерно-ультразвукового воздействий наблюдается ферритная сетка.

Лазерная обработка круглым пятном обеспечивает максимальную глубину упрочнённой зоны 0,65 мм. Глубина упрочнённой зоны, формируемой лучом, трансформированным в полосу, не превышает 0,45 мм. Эти значения, как и значения микротвёрдости, обусловлены достигаемой температурой поверхности при прочих равных условиях. Распределения микротвёрдости по глубине зон лазерного воздействия в образцах, обработанных с различными скоростями перемещения луча, трансформированного в полосу или сфокусированного в круглое пятно, приведены на рис. 1. Анализ экспериментальных результатов показал, что зависимости H от z могут быть представлены в виде квадратичных функций

$$H = a - b(z + c)^2, \quad (1)$$

где a [ГПа], b [ГПа/мм²] и c [мм] — постоянные, значения которых определяются по трём парам значений H [ГПа] и z [мм] в пределах каждого отдельного распределения. Как следует из рис. 1, экспериментальные точки в целом хорошо ложатся на расчётные кривые.

На рис. 2 и 3 представлены результаты испытаний на износ поверхностей трения стали 40X в исходном отожжённом состоянии после её лазерной и лазерно-ультразвуковой обработок и после объёмной термообработки. Сравнительный анализ этих результатов в сопоставлении с приведёнными на рис. 1 зависимостями H от z приводит к очевидному выводу, что чем выше микротвёрдость, тем меньше износ, определяемый наклоном соответствующих кривых. Наклон кривых износа поверхностей, подвергнутых лазерной и лазерно-ультразвуковой

Рис. 1. Распределения микротвёрдости $H_{0,98}$ по глубине z зон лазерного (1, 2, 3, 4, 6, 7) и лазерно-ультразвукового (5) упрочнения поверхности отожжённой стали 40X лучом, трансформированным в полосу (1–5) и сфокусированным в круглое пятно (6, 7): v , мм/с: 1 — 6,3; 2 — 3,9; 3 — 2,9; 4, 5 — 1,9; 6 — 6,4; 7 — 5,6; 8 — исходная отожжённая сталь; 9 — объёмно термообработанная сталь. Результаты расчёта по формуле (1) изображены сплошными линиями

Рис. 2. Экспериментальные зависимости износа W поверхностей трения отожжённой стали 40X после её лазерного упрочнения лучом, трансформированным в полосу, от числа циклов испытаний N : v , мм/с: 1 — 6,3, 2 — 3,9, 3 — 2,9; $F = 10$ Н; $\nu = 0,40$ Гц

обработкам, по мере увеличения числа циклов испытаний плавно возрастает, асимптотически приближаясь к наклону прямой, соответствующей износу поверхности стали 40Х в исходном отожжённом состоянии.

Зависимость тангенса угла наклона кривых износа в самом начале циклов испытаний от микротвёрдости соответствующих поверхностей приведена на рис. 4. В результате анализа данной зависимости получено эмпирическое аналитическое соотношение

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{310}{H^{7/2}} \cdot 10^{-5}, \quad (2)$$

взаимосвязывающее величину тангенса угла $\operatorname{tg} \alpha$ [г/цикл] наклона кривых износа и микротвёрдость H [ГПа] изнашиваемого слоя.

На основании соотношений (1) и (2), выведено аналитическое выражение, связывающее величину износа W с числом циклов испытаний N :

$$N = \frac{1}{384} \frac{a^{7/2} B}{A} \left\{ \left(\frac{W}{B} + c \right) \sqrt{1 - \frac{b}{a} \left(\frac{W}{B} + c \right)^2} \left[279 - 326 \frac{b}{a} \left(\frac{W}{B} + c \right)^2 + 200 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \left(\frac{W}{B} + c \right)^4 - \right. \right. \\ \left. \left. - 48 \left(\frac{b}{a} \right)^3 \left(\frac{W}{B} + c \right)^6 \right] + 105 \sqrt{\frac{a}{b}} \arcsin \left[\sqrt{\frac{b}{a}} \left(\frac{W}{B} + c \right) \right] - c \sqrt{1 - \frac{b}{a} c^2} \left[279 - 326 \frac{b}{a} c^2 + 200 \left(\frac{b}{a} \right)^2 c^4 - \right. \right. \\ \left. \left. - 48 \left(\frac{b}{a} \right)^3 c^6 \right] - 105 \sqrt{\frac{a}{b}} \arcsin \left(\sqrt{\frac{b}{a}} c \right) \right\}. \quad (3)$$

Здесь $A = 3,1 \cdot 10^{-3}$ [(г/цикл) · ГПа^{7/2}], $B = \pi D h \rho$ [г/мм], $D = 50$ [мм] — диаметр образца, $h = 10$ [мм] — толщина колодки, $\rho = 7,87 \cdot 10^{-3}$ [г/мм³] — плотность стали, W [г], N [цикл]. Рассчитанные по формуле (3) зависимости в сопоставлении с экспериментальными данными (рис. 2 и 3) приведены на рис. 5 и 6. Хорошее согласие результатов расчёта и эксперимента позволяет использовать формулу (3) для прогнозирования развития процесса износа поверхности стали, подвергнутой воздействию лазерного или лазерно-ультразвукового источника.

Рис. 3. Экспериментальные зависимости износа W поверхностей трения исходной отожжённой стали 40Х (1), после её лазерного (2, 3, 5) и лазерно-ультразвукового (4) упрочнения лучом, трансформированным в полосу (3, 4) и сфокусированным в круглое пятно (2, 5), и после её объёмной термообработки (6) от числа циклов испытаний N : v , мм/с: 2 — 6,4; 3, 4 — 1,9; 5 — 2,9; $F = 10$ Н; $\nu = 1,33$ Гц

Рис. 4. Зависимость тангенса угла наклона $\operatorname{tg} \alpha$ кривых износа в самом начале циклов испытаний от микротвёрдости $H_{0,98}$ соответствующих поверхностей. Результат расчёта по формуле (2) изображён сплошной линией

Рис. 5. Рассчитанные по формуле (3) зависимости (кривые, изображённые сплошными линиями), связывающие величину износа W с числом циклов испытаний N . Обозначения экспериментальных точек соответствуют рис. 2

Рис. 6. Рассчитанные по формуле (3) зависимости (кривые, изображённые сплошными линиями), связывающие величину износа W с числом циклов испытаний N . Обозначения экспериментальных точек соответствуют рис. 3

С точки зрения существующих представлений [10–14] во всех рассмотренных случаях износ носит усталостный характер вне зависимости от микротвёрдости и степени дисперсности структуры. Возрастание последних ведёт к уменьшению размеров зон пластической деформации и разрушения. На рис. 7 и 8 показаны структуры изношенных поверхностей отожжённой и объёмно термообработанной стали 40Х. Хорошо видны образующиеся в процессе износа наклёпанные слои в зоне Сен–Венана, которые по мере развития процесса удаляются с поверхности в виде отдельных чешуек. Размер чешуек коррелирует со степенью дисперсности структуры и её микротвёрдостью. Исходя из этого, эффект сглаживания изменения величины износа на границе между закалённым лазером слоем и основным объёмом отожжённой стали можно объяснить следующим образом. Более упругий закалённый слой менее подвержен пластической деформации и вовлекает в движение более пластичный нижележащий слой. Это приводит к тому, что к моменту износа закалённого лазером слоя исходный отожжённый материал изменяет свою структуру и повышает твёрдость. Результатом является плавное изменение угла наклона кривых износа на рис. 2 и 3.

Для более тщательного изучения данного процесса закалённый лазером образец подвергался износу до глубины, примерно равной глубине закалки. Лазерная обработка осуществлялась лучом, трансформированным в полосу, со скоростью перемещения последнего 1,9 мм/с. При этом микротвёрдость поверхности образца достигала 5,3 ГПа. При износе частота вращения диска составляла 2,17 Гц, а сила прижима колодки к диску — 10 Н. Распределение микротвёрдости по глубине образца приведено на рис. 9 (кривая 1). Здесь штриховой линией обозначена примерная глубина износа образца. По завершению изнашивания поверхности измерения мик-

Рис. 7. Структура изношенной поверхности исходной отожжённой стали 40Х. Увеличено в 320 раз

Рис. 8. Структура изношенной поверхности объёмно термообработанной стали 40Х. Увеличено в 320 раз

ротвёрдости показали, что она превышает микротвёрдость отожжённой стали 40Х и составляет $2,4 \div 2,5$ ГПа. Измерения проводились на глубине от 0,04 до 0,10 мм от изношенной поверхности (точки 2 на рис. 9). Полученные значения указывают на то, что на самой поверхности сформировался наклёпанный слой, аналогичный слоям, показанным на рис. 7 и 8. Измерения микротвёрдости вблизи поверхности затруднены, т. к. попадание индентора микротвердомера в полосу течения или в место концентрации микротрещин приводит к росту разброса результатов. Совокупность точек 3 на рис. 9 характеризуется разбросом значений микротвёрдости от 4,6 до 6,6 ГПа. Измерения твёрдости по методу Виккерса со стороны изношенной поверхности при переменной нагрузке (точки 4 на рис. 9) непосредственно позволяют выявить рост твёрдости от 2,9 до 4,6 ГПа по мере приближения к поверхности.

Таким образом, в процессе износа закалённого лазером слоя в структуре отожжённой стали под закалённым слоем происходят существенные изменения, ведущие к формированию наклёпанного слоя с высокой микротвёрдостью. Следствием этого является монотонный характер кривых износа, приведённых на рис. 2 и 3.

Формирование наклёпанных слоев в процессе изнашивания поверхностей трения стали 40Х характеризуется изменением их структурно-напряжённого состояния, о чём свидетельствуют данные рентгеновского фазового анализа и измерения остаточных напряжений. Остаточный аустенит лазерной закалки в процессе изнашивания поверхностей трения превращается в мартенсит деформации. На дифрактограммах интенсивность линий остаточного аустенита уменьшается, а интенсивность мартенситных линий возрастает. Величина сжимающих остаточных напряжений изменяется от -100 МПа для отожжённого состояния до -300 МПа для структуры лазерной закалки и до -500 МПа для изношенной закалённой лазером поверхности.

Для детализации особенностей износа при трении скольжения измерялась микротвёрдость в зоне Сен–Венана в отожжённых образцах и образцах, прошедших лазерную закалку до различных значений микротвёрдости. Полученные результаты сведены в табл. 2. Эти результаты свидетельствуют о том, что независимо от исходного состояния материала в зоне Сен–Венана происходят однотипные изменения, ведущие к формированию особого структурно-напряжённого состояния.

Заключение. Таким образом, в результате проведённых исследований показана эффективность использования лазерной и лазерно-ультразвуковой обработок для повышения износостойкости поверхности в условиях сухого трения скольжения. Выявлена тенденция повышения износостойкости с возрастанием микротвёрдости поверхностных слоев. Получены эмпири-

Рис. 9. Распределение микротвёрдости H по глубине z зоны лазерного воздействия и прилегающей к ней зоны в отожжённой стали 40Х до (1) и после (2–4) износа: 1–3 — $H_{0,98}$, 4 — HV ; $F = 10$ Н; $\nu = 2,17$ Гц; штриховой линией обозначена примерная глубина износа

Таблица 2

Микротвёрдость наклёпанных слоев в зоне Сен–Венана в стали 40Х с различным исходным состоянием поверхности ($F = 10$ Н, $\nu = 0,40$ Гц)

№ п/п	Исходная микротвёрдость поверхности, ГПа	Число циклов испытаний, 10^3	Микротвёрдость наклёпанного слоя в зоне Сен–Венана, ГПа
1	2,1	70	4,4
2	2,1	170	4,8
3	3,6	80	4,6
4	4,8	5	4,7
5	4,8	20	4,7
6	6,5	5	4,6

ческие аналитические соотношения, связывающие параметры износа с микродюриметрическими характеристиками поверхности. Установлен усталостный характер износа, который сопровождается формированием наклёпанных слоев, удаляемых с поверхности в виде отдельных чешуек. Процесс износа сопровождается формированием особого структурно-напряжённого состояния, характеризующегося постоянным уровнем твёрдости в зоне полос пластического течения вне зависимости от предшествующего состояния материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бирюков, В. П. Лазерная закалка поверхностей трения серого чугуна сканирующим лучом [Текст] / В. П. Бирюков // Трение и износ. — 1986. — Т. 7, № 4. — С. 718–721.
2. Дубняков, В. Н. Влияние предшествующей обработки на пластичность и абразивную износостойкость метастабильных слоев [Текст] / В. Н. Дубняков // Трение и износ. — 1985. — Т. 6, № 5. — С. 827–834.
3. Дубняков, В. Н. Повышение износостойкости трущихся поверхностей деталей лазерным упрочнением [Текст] / В. Н. Дубняков, С. П. Козырев, И. Л. Пимков // Трение и износ. — 1984. — Т. 5, № 4. — С. 713–714.
4. Суслов, А. Г. Исследование возможностей повышения динамической поверхностной прочности сталей с помощью лазерного легирования [Текст] / А. Г. Суслов, Ю. В. Колесников, В. П. Инютин // Трение и износ. — 1985. — Т. 6, № 5. — С. 872–877.
5. Алисин, В. В. Определение параметров упрочнения зон при закалке сканирующим лазерным лучом [Текст] / В. В. Алисин, В. П. Бирюков // Трение и износ. — 1988. — Т. 9, № 6. — С. 1027–1031.
6. Михин, Н. М. Исследование влияния лазерного излучения на физико-механические характеристики поверхностных слоев деталей и их износостойкость при абразивном изнашивании [Текст] / Н. М. Михин, Л. Н. Обищенко, Г. И. Козлов и др. // Трение и износ. — 1983. — Т. 4, № 4. — С. 648–653.
7. Коршунов, Л. Г. Исследование износостойкости и структурных превращений при абразивном изнашивании стали У8, упрочнённой лазером [Текст] / Л. Г. Коршунов, А. В. Макаров, А. Л. Осинцева // Трение и износ. — 1988. — Т. 9, № 1. — С. 52–59.
8. Исследование влияния лазерного упрочнения в режиме глубинного проплавления на физико-механические характеристики поверхностных слоев стальных деталей и их износостойкость при абразивном изнашивании [Текст] / Г. И. Козлов, Л. Н. Обищенко, Н. М. Мухин и др. // Трение и износ. — 1984. — Т. 5, № 2. — С. 251–257.
9. Проблемы изнашивания твёрдых тел в аспекте механики [Текст] / А. Ю. Ишлинский, И. В. Крачельский, Н. М. Алексеев и др. // Трение и износ. — 1986. — Т. 7, № 4. — С. 581–592.
10. Крачельский, И. В. Трение и износ [Текст] / И. В. Крачельский. — М.: Машиностроение, 1968. — 480 с.
11. Костецкий, Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении [Текст] / Б. И. Костецкий. — Киев: Техника, 1976. — 292 с.
12. Новое о структурных особенностях трения твёрдых тел [Текст] / Н. М. Алексеев, Р. И. Богданов, Н. А. Буше и др. // Трение и износ. — 1988. — Т. 9, № 6. — С. 965–973.
13. Алексеев, Н. М. Новое о структурных особенностях изнашивания твёрдых тел [Текст] / Н. М. Алексеев // Трение и износ. — 1989. — Т. 10, № 2. — С. 197–205.
14. Поляков, А. А. Природа и границы применения избирательного переноса [Текст] / А. А. Поляков // Трение и износ. — 1988. — Т. 9, № 3. — С. 473–480.
15. Алексеев, Н. М. Некоторые аспекты совместимости материалов при трении. I. Подповерхностные процессы [Текст] / Н. М. Алексеев, Н. А. Буше // Трение и износ. — 1985. — Т. 6, № 5. — С. 773–783.
16. Костецкий, Б. И. Механические процессы при граничном трении [Текст] / Б. И. Костецкий, М. Э. Натансон, Л. И. Бершадский. — М.: Наука, 1972. — 170 с.
17. Алексеев, Н. М. Особенности пластического течения металлов при трении и их влияние на процессы трения и изнашивания [Текст] / Н. М. Алексеев, И. В. Крачельский, А. М. Шапиро // Трение и износ. — 1983. — Т. 4, № 3. — С. 389–397.