

PACS numbers: 06.60.Vz, 46.55.+d, 61.72.Hh, 62.20.Qr, 81.40.Pq, 83.50.Lh

Металловедческие аспекты в процессах разрушения металлических материалов при трении

С. А. Беспалов

*Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины,
бульв. Акад. Вернадского, 36,
03680, ГСП, Киев, Украина*

Проведен обзор работ, в которых рассмотрено влияние механических характеристик, химического состава, параметров микроструктуры на износостойкость сталей. Показано, что металловедческий подход к вопросам трибологии является одним из основных путей для существенного повышения эксплуатационных свойств подвижных соединений.

Виконано огляд праць, в яких розглянуто вплив механічних характеристик, хімічного складу, параметрів микроструктури на зносостійкість сталей. Показано, що металознавчий підхід до питань трибології є одним з основних шляхів для суттєвого підвищення експлуатаційних властивостей рухомих з'єднань.

The review of articles is performed, in which the influences of mechanical characteristics, chemical composition, microstructure parameters on the wear resistance of steels are discussed. As shown, the physical-metallurgy approach for tribology problems is one of the main ways to the considerable increasing of performance characteristics of sliding joints.

Ключевые слова: сталь, механические характеристики, химический состав, микроструктура, износостойкость.

(Получено 21 декабря 2009 г.)

ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности, требующее постоянного повышения мощности и быстроходности машин, необходимости их работы в различных средах при низких и повышенных температурах, ставит задачи непрерывного увеличения надежности и долговечности деталей и узлов машин.

Современное состояние знаний физических и механических свойств материалов позволяет обеспечить достаточную прочность конструкций с большой гарантией от поломок при нормальных условиях эксплуатации. В то же время до 90% механизмов выходят из строя не из-за полного их разрушения, а в результате износа рабочих поверхностей деталей. При этом затраты на ремонт и техническое обслуживание машин в 5–8 раз превышают их стоимость, а вынужденные простои приводят к уменьшению производительности на 15–20% [1–15].

В передовых странах мира эффективное внедрение результатов триботехники в практику дает колоссальную экономию средств [1, 16]. Учитывая, что долговечность и длительность эксплуатации машин в большинстве случаев зависят от износостойкости подвижных соединений [17–24 и др.], минимизация изнашивания является одним из центральных звеньев решения таких проблем, как обеспечение надежности и безопасности механических систем, а также экономия энергии и сокращение расходов материалов.

В большом массиве опубликованных работ по различным аспектам трибологии очень мало исследований, касающихся металловедческой стороны в природе изнашивания [25]. Это подтверждает необходимость исследования общих закономерностей разрушения в условиях контактного взаимодействия и их связи с особенностями структурообразования при различных технологиях изготовления и обработки деталей. Приобретенный при этом опыт может значительно сократить затраты на восстановление и ремонт механизмов и машин, существенно повысить их безопасность и производительность.

1. МОДЕЛИ ИЗНОСА И КОНТАКТА ТЕЛ ПРИ ТРЕНИИ

На основании результатов многолетних исследований предложен ряд моделей, используемых в машиностроении, с определенным приближением при расчетах износа деталей: теория усталостного изнашивания по Крагельскому [26, 27], энергетическая теория износа по Фляйшеру [28, 29], теория износа по Мак-Грегору [4], механико-геометрические теории трения и износа Хрущова, Бабичева [30, 31] и Кокса [4], адгезионные теории износа Хольма, Барвелла и Стронга [4], комбинированные теории [4] и др. Но в настоящее время отсутствуют как общие, так и частичные теории трения и износа, которые были бы развитыми настолько хорошо, что могли быть применены для расчета конкретных сопряжений.

К наиболее важным теориям относят теории Крагельского, Фляйшера, Мак-Грегора [4], в соответствии с которыми при изучении механики взаимодействия элементов подвижных соединений машин используют обобщенную модель контакта, рассматривающую взаи-

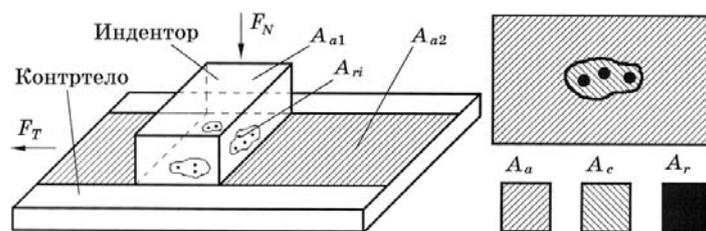


Рис. 1. Обобщенная модель контакта твердых тел при трении [4, 32]: A_{a1} — номинальная площадь контакта индентора; A_{a2} — номинальная площадь контакта контртела; A_{ri} — площадь одного пятна контакта; A_r — фактическая площадь контакта, $A_r = \sum A_{ri}$; A_{cj} — контурная площадь контакта в j -й зоне; A_{cc} — контурная площадь контакта, $A_{cc} = \sum A_{cj}$; F_N — нормальная сила; F_T — тангенциальная сила.

модействии дискретных элементов поверхности (рис. 1) [4, 32 и др.].

Согласно [4, 32–36] контакт твердых тел до определенного давления происходит лишь на небольших участках поверхности — пятнах контакта. Суммарная площадь этих участков является фактической площадью контакта, составляющей незначительную часть номинальной, зависящей от шероховатости поверхности и условий нагрузки. В свою очередь фактические пятна контакта, сконцентрированные на контурных площадках (предельное значение фактической площади контакта), определяются микрогеометрией контакта, волнистостью контактирующих поверхностей и отклонением их от геометрической формы (рис. 2). В процессе трения фактические пятна контакта постоянно изменяются, двигаясь по контурной площади контакта.

Многочисленными исследованиями установлено, что средний диаметр пятен контакта при трении металлических материалов находится в пределах от 6 до 30 мкм [37–39]. Расстояние между пятнами контакта, в зависимости от нагрузки, изменяется от 80 до 120 мкм [37, 38].

Формирование физического контакта связано с наличием субмикрорельефа, развитие которого обусловлено внутренним строением твердых тел, его несовершенствами, деформациями локальных поверхностных объемов металла и физико-химическим дейст-

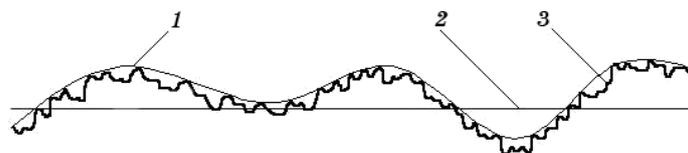


Рис. 2. Геометрия поверхности [4, 32]: 1 — огибающая профиля (волнистость поверхности); 2 — средняя линия профиля; 3 — профиль поверхности (шероховатость).

вием окружающей и рабочей сред в зоне контакта [40].

Следует отметить, что при анализе обобщенной модели контакта не учитывают дискретное строение материалов, размерные характеристики составляющих структуры и их соотношение с дискретными элементами поверхности контакта.

2. СВЯЗЬ МЕЖДУ МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ И СОПРОТИВЛЕНИЕМ КОНТАКТНОМУ РАЗРУШЕНИЮ

К основным требованиям, определяющим износостойкость сталей, можно отнести высокое сопротивление растяжению, сжатию, изгибу, сдвигу и срезу, сочетание пластичности и достаточно высокой твердости, стойкости механических свойств к воздействию высоких температур и давлений в условиях изнашивания [41–43].

При конструировании узлов трения предпочтение отдают высокопрочным сталям. Но в отличие от прочности, износостойкость — величина, зависящая от многих факторов, таких как внешняя нагрузка, температурное воздействие, охлаждение зоны трения и т. д.

Длительное время основным критерием изнашивания стали считали ее твердость. Экспериментальной основой этой концепции служила работа [30]. Этот методический подход утвердился, прежде всего, потому, что износ закаленной стали удовлетворительно коррелирует с ее твердостью, полученной после различных температур отпуска. Такие результаты подтверждаются многими авторами [44–49], а в методическом подходе определенную роль сыграла простота определения твердости.

Влияние механических характеристик стали на ее износостойкость, помимо твердости, начали изучать сравнительно недавно. Исследования последних лет показывают, что природа изнашивания значительно более сложная и не может оцениваться только твердостью. Так, в обзоре [50] рассмотрено влияние твердости, предела прочности и пластичности материала на абразивный износ. Показано, что наиболее тесно износостойкость связана с твердостью и пластичностью. Поэтому предложено несколько критериев абразивной стойкости сталей, включающие модуль упругости E , твердость HV , характеристики пластичности ψ и прочности σ_B .

В [51] исследовали износостойкость стали 40X в условиях трения без смазки в отожженном состоянии, после закалки до различной микротвердости поверхности при нагреве непрерывным CO_2 -лазером и объемной закалки. В процессе изнашивания наблюдалось формирование наклепанных слоев, удаляемых с поверхности в виде отдельных чешуек, размер которых коррелировал с микротвердостью структуры. Чем выше была микротвердость структуры, тем меньше размер чешуек и меньшей была интенсивность изнашивания исследуемых образцов.

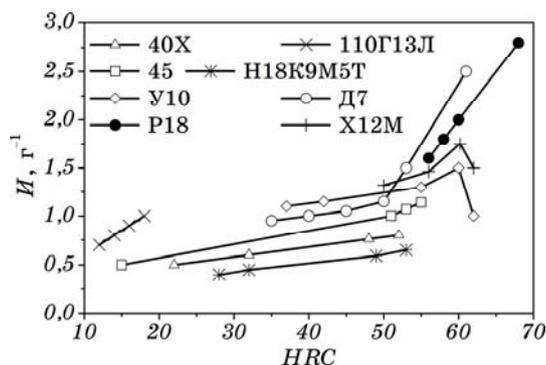


Рис. 3. Зависимость износостойкости сталей от твердости [52].

В [52] оценивали абразивную износостойкость сталей различного класса. Полученная зависимость (рис. 3) показывает, что стали с одинаковой твердостью в одинаковых условиях испытания имеют разные ее значения. Выявлена связь износостойкости закаленных сталей с ростом соотношения предела прочности к пределу текучести. Считается, что при одинаковом значении твердости износостойкость выше там, где отношение $\sigma_B/\sigma_{0,2}$ минимально. При этом изменении соотношения $\sigma_B/\sigma_{0,2}$ с 1,05 до 1,2 износостойкость понижается в 2–3 раза.

В [42, 53–56] были проведены систематические исследования взаимосвязи износостойкости закаленной стали в условиях изнашивания при трении скольжения по абразиву с большинством ее стандартных механических характеристик. С этой целью были подобраны стали различных структурных классов с разным уровнем механических свойств: перлитного класса, средней и высокой прочности, карбидного, аустенитного и мартенситного. Показано, что при одинаковой схеме испытания влияние всех характеристик на износостойкость стали было различным.

Также было установлено, что некоторые одинаковые механические характеристики, полученные в разном структурном состоянии, дают неодинаковые значения износостойкости, что объясняется существованием хрупкой и вязкой области разрушения образцов. Механические свойства стали влияют на ее износостойкость по-разному и не всегда однозначно в хрупкой и вязкой области разрушения.

Влияние предела прочности стали на ее стойкость к изнашиванию представлено сложной зависимостью (рис. 4, а). В вязкой области разрушения с возрастанием σ_B износостойкость увеличивается, а в хрупкой — уменьшается. На образцах с одинаковым пределом прочности, но с разным характером разрушения наблюдаются отличия в износостойкости, причем большие на образцах с хрупким характером разрушения.

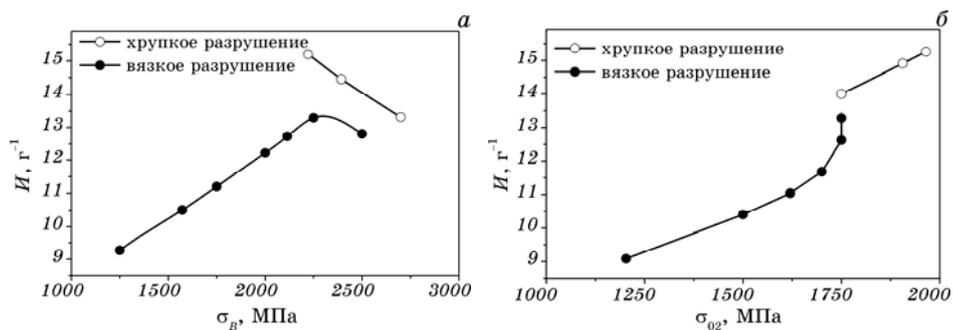


Рис. 4. Зависимость износостойкости сталей от пределов прочности (а) и текучести (б) [43, 53–55].

Влияние предела текучести имеет более определенный характер. Общая тенденция этой зависимости проявляется однозначно: с возрастанием предела текучести в хрупкой и вязкой области разрушения износостойкость сталей возрастает (рис. 4, б).

При анализе связи износостойкости сталей с пределом прочности и твердостью получена обобщенная диаграмма (рис. 5). При твердости меньше 50 HRC отличие сталей по прочности мало отражается на износостойкости в связи с незначительной разницей по пластичности. При твердости свыше 50 HRC различие по пластичности существенно сказывается на износостойкости, так как в этом структурном состоянии ее роль уменьшается, а большее значение в формировании частичек износа отыгрывает прочность.

Все показатели пластичности — относительное удлинение, относительное сужение и ударная вязкость — влияют на износостойкость стали однозначно: по мере их увеличения износостойкость стали уменьшается (рис. 6).

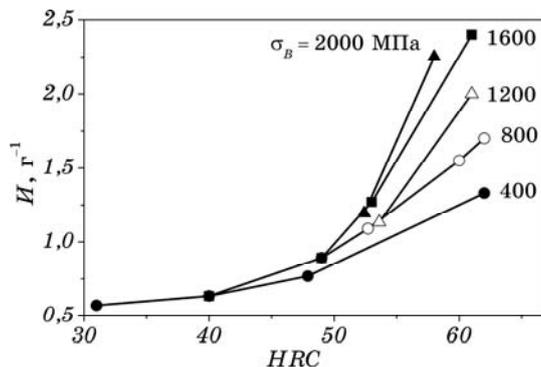


Рис. 5. Зависимость износостойкости сталей от их твердости и предела прочности [43, 53–55].

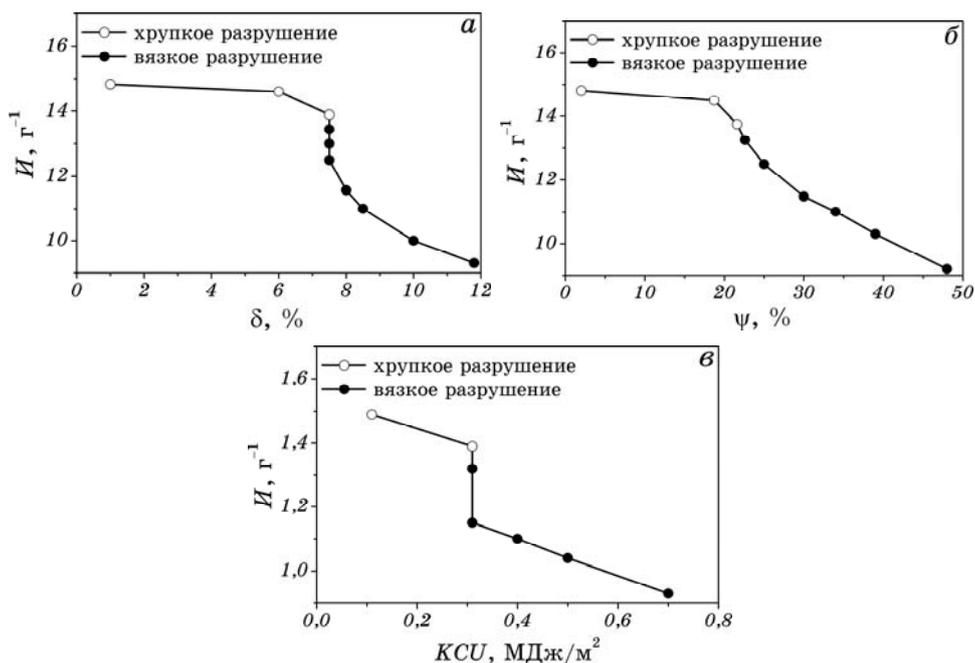


Рис. 6. Зависимость износостойкости сталей от относительного удлинения (а), относительного сужения (б) и ударной вязкости (в) [43, 53–55].

На типовых зависимостях износостойкости стали от предела текучести (рис. 4, б), относительного удлинения (рис. 6, а), относительного сужения (рис. 6, б) и ударной вязкости (рис. 6, в) наблюдается предельный переход, связанный с хрупким и вязким разрушением. В переходной предельной зоне одному значению характеристики соответствуют несколько значений износостойкости. Объяснить эту особенность можно тем, что равные значения предела текучести, относительного удлинения, относительного сужения и ударной вязкости получены для разных структур, сформированных при различных температурах отпуска.

В закаленной стали при разных температурах отпуска сопротивление срезам и предел выносливости имеют определенную симметрию относительно границы хрупко-вязкого перехода (рис. 7, а, б). Влияние $\tau_{\text{ср}}$ и σ_{-1} на износостойкость стали аналогично влиянию предела прочности.

Общий характер этих зависимостей состоит в том, что четко прослеживается различное влияние этих характеристик на износостойкость стали в хрупкой и вязкой областях разрушения. В хрупкой повышение σ_B , τ и σ_{-1} вызывает снижение износостойкости, а в вязкой — ее повышение (рис. 4, а, рис. 7, а, б).

Подобные зависимости были получены и для трения скольжения

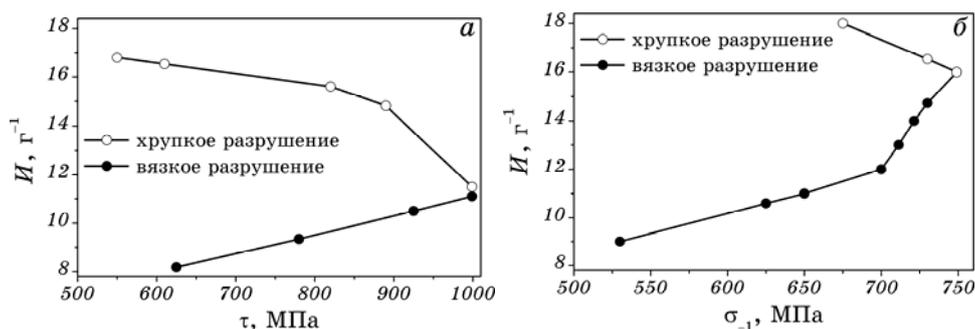


Рис. 7. Зависимость износостойкости сталей от сопротивления срезу (а) и предела выносливости (б) [43, 53–55].

стали по стали без смазки [43, 57].

Учитывая, что в любых условиях трения положительную роль играют характеристики пластичности при максимальной прочности и твердости, изучались комплексные критерии оценки износостойкости, объединяющие эти параметры. К сожалению, по этому вопросу взгляды исследователей разделились. В одних работах утверждается, что линейный характер носит зависимость износостойкости от произведения предела прочности на относительное удлинение $\sigma_B \cdot \delta$ [58]. Другие авторы однозначным показателем износостойкости считают объединение характеристик микротвердости и микрохрупкости [59]. В то же время согласно [56, 60, 61] универсальным критерием является произведение предела прочности на относительное сужение $\sigma_B \cdot \psi$, позволяющим объяснить не только различия в износостойкости сталей при равных значениях одной из характеристик прочности, но и различия предела выносливости при равном значении предела прочности.

Анализируя вышеизложенное, есть основания считать, что отдельно взятая стандартная механическая характеристика не может быть в полной мере критерием оценки износостойкости сталей. Это свидетельствует о том, что кроме механических характеристик на износ существенное влияние оказывает микроструктура материалов.

3. РОЛЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА В ПРОЦЕССАХ ИЗНОСА СТАЛЕЙ

Длительное время главным направлением борьбы с износом и уменьшением силы трения было повышение твердости рабочих поверхностей деталей, при котором уменьшается взаимное проникновение одной поверхности в другую, снижаются пластические деформации, окислительные процессы, действие абразива и др. Это

направление в значительной мере позволило увеличить надежность пар трения и до сегодняшнего времени является мощным методом продления срока их службы.

Но с возрастанием в узлах трения нагрузок, ухудшающих в некоторых случаях условия смазки, с повышением требований к КПД механизмов, применением в машинах специальных смазочных жидкостей, традиционные методы повышения износостойкости путем увеличения твердости материалов перестали себя оправдывать. С ростом твердости уменьшается фактическая площадь контакта, а в результате неизбежных перекосов деталей при эксплуатации увеличивается вероятность их заедания и повышенного износа [1, 62]. В то же время встречаются ситуации, когда практически невозможно одновременно упрочнить оба элемента пары трения (например, колесо вагона или бандаж тепловозного колеса и железнодорожный рельс). Хотя иногда повышение твердости одного из элементов не больше определенного значения и несущественно сказывается на износе сопряженного с ним, позволяя повысить износостойкость узла трения [63, 64], в общем, это приводит к перераспределению интенсивностей изнашивания и в лучшем случае незначительно отображается на суммарном износе пары [63, 65–67]. В связи с этим исследования были направлены на определение роли химического состава и параметров микроструктуры в процессах разрушения материалов при износе.

Значительная часть работ как зарубежных, так и отечественных авторов посвящена изучению зависимости износостойкости сталей от концентрации углерода. Был исследован широкий спектр сплавов на основе железа с 0,1–1,4% С после разных режимов термической обработки [47], закаленных и отпущенных до одинаковой твердости 55 *HRC* [42, 68], а также при равной твердости 30, 40, 50, 55, 60 *HRC* [56]. Показано, что образцы с твердостью свыше 55 *HRC* и содержанием 0,6–0,7% С имеют максимальную износостойкость в условиях трения по абразиву. Увеличение количества углерода вызывает резкое снижение износостойкости, а также изменение механизма износа от царапания до растрескивания и выкрашивания микрообъемов поверхности трения. В то же время для сталей с более низким уровнем твердости однозначного мнения по этому вопросу не получено. Кроме того, отмечено, что в легированных сталях, в отличие от углеродистых, содержание углерода не является решающим фактором, влияющим на стойкость к абразивному износу. Уменьшает интенсивность изнашивания сталей легирование хромом, марганцем, вольфрамом.

Большое внимание исследователей было уделено изучению износостойкости сталей с феррито-перлитной структурой. Показано, что сопротивление износа, пластической деформации, а также контактно-усталостная прочность феррито-перлитной структуры определяется основными ее параметрами: величиной межпластинчато-

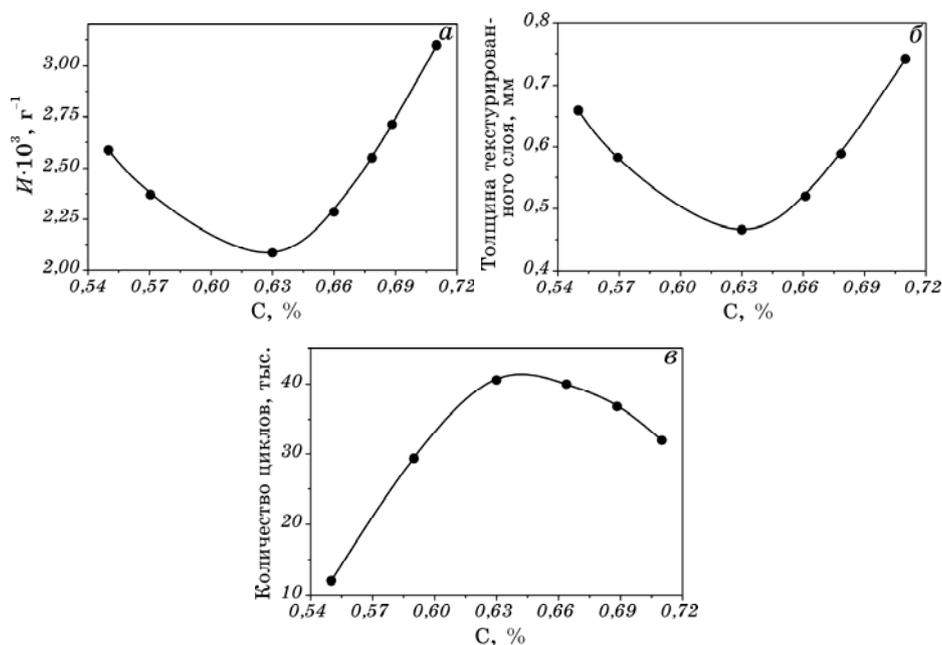


Рис. 8. Влияние содержания углерода на износостойкости (а), глубину текстурированного слоя (б) и контактно-усталостную прочность стали (в) [75].

го расстояния, количеством структурно свободного феррита, толщиной цементитных пластин [63, 69–74]. Однако по вопросу о влиянии концентрации углерода мнения исследователей несколько разошлись.

Так, при изучении характеристик износа колесных сталей [75] были получены экстремальные зависимости износостойкости, глубины проникновения пластической деформации, определяемой по толщине текстурированного слоя, и контактно-усталостной прочности от содержания углерода (рис. 8). Показано, что межпластинчатое расстояние в перлите с увеличением содержания углерода в исследованных сталях возрастает практически линейно, а количество структурно свободного феррита — уменьшается (рис. 9).

Поэтому при одинаковом уровне твердости наилучшая износостойкость присуща образцам с 0,62–0,64% С. Большой износ сталей, содержащих 0,55–0,58% С, объясняют наличием значительной доли структурно свободного феррита, а с содержанием свыше 0,67% С — увеличением межпластинчатого расстояния и огрубением частичек цементита, в результате чего изменяется механизм износа и усталостного разрушения. Это хорошо согласуется с тем, что сопротивление распространению трещины в сталях уменьшается с ростом карбидов, которые разрушаются вследствие их недостаточ-

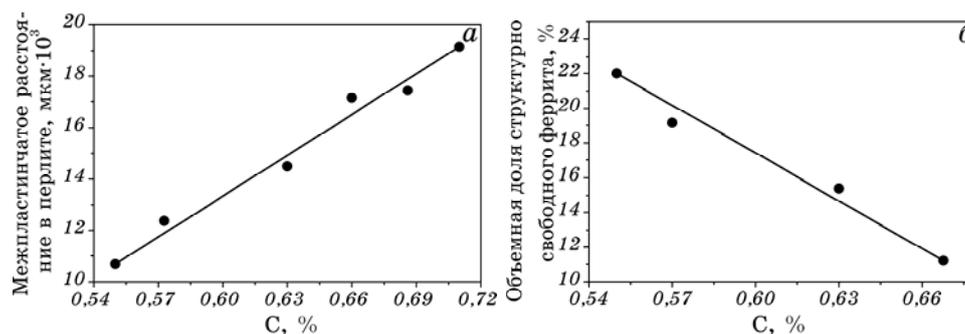


Рис. 9. Влияние содержания углерода на межпластинчатое расстояние в перлите (а) и объемную долю структурно свободного феррита (б) [75].

ной деформационной способности или инициируют разрушение на границе хрупкий карбид–пластическая матрица [69].

По другим данным повышение концентрации углерода в сталях с феррито-перлитной структурой целесообразно лишь до 0,55% [63]. Однако расхождение во мнениях можно объяснить, в том числе, и различными условиями испытаний, что подтверждается результатами исследований [76], в которых при разных контактных давлениях износ связывали прямо пропорциональной зависимостью либо с величиной $S^{1,31}$, либо с $S^{0,47}$, где S — расстояние между карбидными пластинками в перлите.

4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОСТРУКТУРЫ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛЕЙ

Анализ многолетних исследований [41, 42, 52–57, 74–95] показывает, что твердость и химический состав не всегда являются решающим фактором в определении износостойкости сталей, и возможно уменьшение износа на 20–30%, а в некоторых случаях в 2–3 раза, только за счет изменения параметров микроструктуры.

Учитывая, что величина зерна оказывает влияние на механические характеристики сталей [62, 96–107], внимание трибологов было обращено на эту характеристику структуры [82–84, 86, 108–114].

Известно [115], что регулярное строение поликристаллитов нарушается близ границ разделов, между фазовыми составляющими, поэтому границы зерен, микротрещины, поры и прочие дефекты микроструктуры являются местами локальной концентрации внутренних напряжений и имеют повышенный уровень свободной энергии. Считается [116], что определенные границы зерен ослаблены за счет сегрегации некоторых легирующих элементов. Это приводит к тому, что дислокации и трещины наиболее часто зарож-

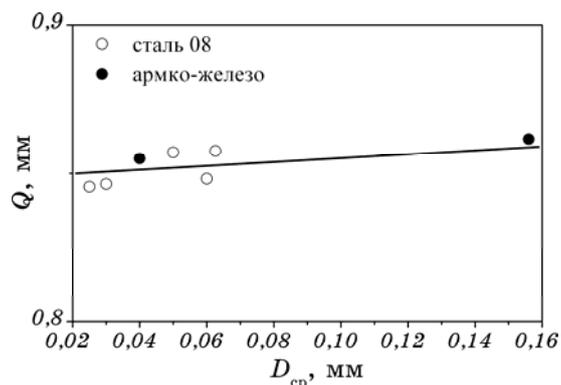


Рис. 10. Зависимость износа (Q) от среднего диаметра зерна ($D_{ср}$) стали 08 и армко-железа после отпуска от разных температур [82].

даются на таких границах. Поэтому в работе [117] было показано, что увеличение общей длины границ зерен, то есть уменьшение их диаметра, повышает интенсивность разрушения сталей при износе.

В работах [82–84, 86] проводили исследования изнашивания сталей 08, 35, 45, 30 ХГТ, В8 и армко-железа при разных термических обработках. Для этого образцы сталей закаливали от температур 1000, 1100, 1200°C и отпускали при 200, 350, 450 и 600°C. В результате был сделан вывод, который отрицает взаимосвязь между величиной аустенитного и ферритного зерна с износостойкостью исследованных сталей и армко-железа, о чем свидетельствует полученная графическая зависимость (рис. 10) [82].

В работах [114, 118–120] не было найдено однозначного ответа на этот вопрос. Показано, что рост зерна в закаленных и высокоотпущенных сталях уменьшает их износостойкость лишь до определенной температуры закалки, выше которой решающую роль в процессе сопротивления износу играет морфология карбидной фазы.

Неоднозначность мнений исследователей можно объяснить влиянием множества других факторов, таких как разные условия проведения испытаний [113], плотность дефектов кристаллической решетки [82], форма и размер карбидов [119] и др.

В литературе встречается целый ряд работ [80–86], посвященных изучению зависимости износа от тонкой структуры сталей при одинаковой или очень близкой твердости образцов. Так, в [80] стали 45 и 40Х и 30ХГТ закаляли от различных температур в интервале 850–1200°C с последующим низким и высоким отпуском. В результате исследований были получены зависимости изнашивания от температуры закалки для низкоотпущенных образцов (рис. 11). Как видно из графиков, минимальные его значения наблюдаются при 1100°C и выдержке 20 мин., а также при 1000°C и выдержке 2 часа.

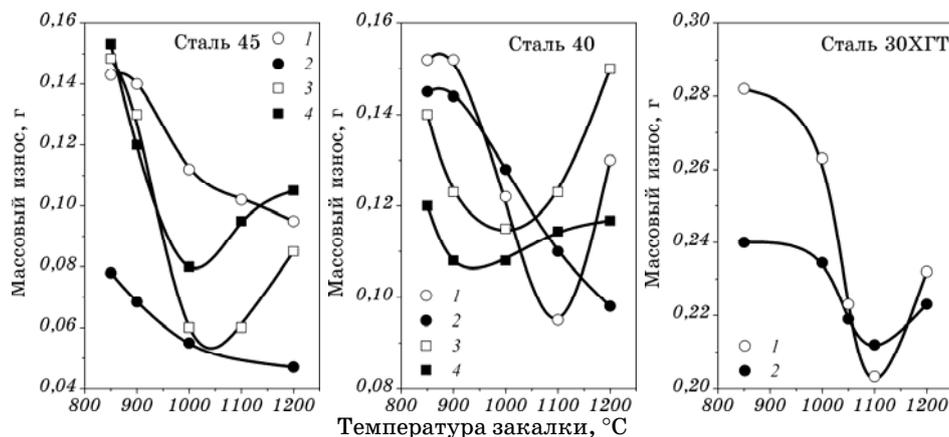


Рис. 11. Зависимость массового износа образцов из низкоотпущенных сталей 45, 40X и 30XГТ от температуры закалки [80]: 1 и 2 — аустенизация 20 мин.; 3 и 4 — аустенизация 2 ч.

Такие температурно-временные режимы термической обработки сталей приводят к образованию максимальной плотности дефектов кристаллической решетки, что повышает сопротивление стали сдвигу, уменьшает степень пластической деформации при трении. При более высоких температурах закалки происходит интенсивная рекристаллизация аустенита и уменьшение плотности дефектов.

В высокоотпущенных образцах сталей 45 и 40X при повышении температуры закалки износ увеличивается, а 30XГТ — снижается. Это связано с тем, что в сталях 45 и 40X при высоком отпуске снимаются микроискажения кристаллической решетки, а повышение температуры закалки приводит к росту зерна аустенита. В то же время в наследственно мелкозернистой стали 30XГТ сохраняется мелкое зерно, а после высокого отпуска — и небольшие микроискажения.

Однако исследования, проведенные в работе [63], показывают, что на сопротивление изнашиванию больше влияет не искажение кристаллической решетки, а наличие и морфология карбидов. Изучение влияния формы карбидных включений на износостойкость сталей и чугунов показало, что износ железо-углеродистых сплавов с вытянутой формой карбидов на 30–40% меньше, чем с глобулярной [63, 77, 119], а изменение направленности карбидов от параллельной до перпендикулярной к поверхности контакта в 2,5–3 раза повышает износостойкость металлических материалов [78, 79]. Это подтверждается моделью процесса износа гетерогенных сплавов типа «матрица–включение» [121], связывающей возрастание износостойкости изотропного двухфазного сплава с увеличением дисперсности включенной фазы и повышением степени ее неравносности.

Исследования, ориентированные на получение оптимальных параметров микроструктуры, позволяют найти резерв в самом материале для повышения его механических характеристик, а также открывают возможности замены высоколегированных дорогостоящих сталей более дешевыми низколегированными. Но, к сожалению, большинство работ направлено на изучение влияния лишь какой-либо отдельной структурной составляющей не учитывая всего комплекса, образующего микроструктуру, а также особенностей механического взаимодействия поверхностей при трении.

5. ОСНОВЫ ОРГАНИЗАЦИИ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАР ТРЕНИЯ

Известно [4, 122], что после приработки узла трения, входящие в него детали приобретают определенную шероховатость, которая в большинстве случаев сохраняется за все время эксплуатации, зависит лишь от условий работы подвижного соединения (нагрузки, скорости, условий смазки и др.) и не зависит от начальных параметров геометрии поверхности (рис. 2). То есть, происходит формирование установленной схемы контакта тел при трении (рис. 1), которую называют оптимальной механической схемой контактного взаимодействия [123].

Огромный практический опыт, а также теоретические и экспериментальные исследования различных пар трения показали необходимость при разработке антифрикционных материалов учета не только комплекса их физико-механических свойств и фазового состава, но и морфологии входящих в них фаз. Одним из ярких примеров сказанному являются баббиты, созданные по известному принципу Шарпи–Бочвара [124–126]. На основании длительных исследований эмпирически установлен их химический состав, обеспечивающий эффективную работу в паре трения со сталью даже без смазки [124]. При этом, как показано в [123], подбор оптимальных химических составов и технологических режимов получения сводился не только к достижению определенных прочностных и литейных характеристик сплавов, а к образованию вполне определенного количества, размеров и распределения в объеме твердых включений, соответствующего оптимальной механической схеме контактного взаимодействия. То есть размеры интерметаллидов в баббитах близки к среднему диаметру пятен контакта, а расстояние между ними — к среднему расстоянию между пятнами.

Работы последних лет показывают, что формирование гетерогенных по механическим характеристикам структур материалов пар трения в эвтектических соединениях [127], композиционных покрытиях [128], полученных методами порошковой металлургии

[129–131] и др., эмпирически создают по тому же принципу — соответствие оптимальной механической схеме контактного взаимодействия.

Таким образом, можно сформулировать основные закономерности и требования к организации износостойких структур.

1. Изначально созданная или сформированная после приработки неоднородность по механическим характеристикам поверхности материала, по размерам и распределению должна соответствовать оптимальной механической схеме контактного взаимодействия при данных условиях эксплуатации узла трения.

2. Локальные участки микроструктуры с повышенными механическими характеристиками, которые потенциально могут служить пятнами контакта, должны обладать высокой прочностью, кроме того, в случае многофазного материала — трещиностойкостью фаз, в том числе и по границам с матрицей, а также стойкостью более твердых включений к диссоциации при пластической деформации при контактном взаимодействии.

3. Эти участки должны располагаться в окружении более мягкой основы, способной играть, в том числе и демпфирующую роль, обеспечивая длительный срок службы пятен контакта.

Примером эффективного использования данных принципов могут служить работы [132–134].

В [132] показано, что повышение температуры закалки от 860 до 1050°C приводит к увеличению на 19% износостойкости образцов стали 40X и одновременно с этим на 29% сопряженного с ним контртела, повышая износостойкости пары трения в целом (рис. 12).

Это достигается тем, что термическая обработка от повышенных температур усиливает неравномерность распределения углерода в стали, что способствует изменению морфологических особенностей

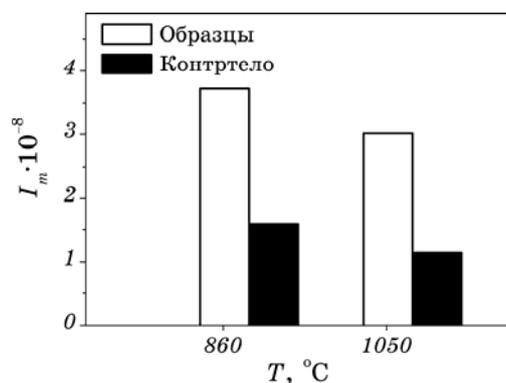


Рис. 12. Влияние температуры закалки (T) на массовую интенсивность износа (I_m) образцов улучшенной стали 40X при одинаковом контртеле [132].

образующихся мартенситов, появлению больших микродвойникованных кристаллов игольчатого мартенсита, формированию внутри них при дальнейшем высоком отпуске крупных карбидов, стойких к диссоциации при пластической деформации, и, соответственно, появлению микрообъемов структуры с повышенной микротвердостью и стойкостью к процессам микродеформации при трении.

В [133, 134] на примере инструментальной стали Х6ВФ, которая имеет гетерогенную структуру благодаря наличию крупных тугоплавких карбидов, показана возможность повышения ее износостойкости почти в 2 раза за счет упрочнения межфазных границ карбид–матрица путем формирования на ней дисперсной мартенситной фазы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Природа трения металлических материалов сложна и многогранна и не может оцениваться какой-либо отдельно взятой механической характеристикой материала.

При трении металлических поверхностей происходит определенная организация поверхностных слоев, которая существенно зависит от механических свойств материалов, их микроструктуры и условий взаимодействия (нагрузки, скорости, условий смазки и др.). К сожалению, наукой еще не вполне раскрыты механизмы самоорганизации в зоне контакта и пути воздействия на способность пар трения к самоорганизации, когда система сама формирует оптимальную микрогеометрию поверхностей, защитные пленки, перестраивает структуру поверхностных слоев металла, меняет твердость в целях сохранения нормального функционирования.

Металловедческий подход к вопросам трибологии является одним из основных путей для существенного повышения эксплуатационных свойств сопряженных соединений. Помимо отбора известных и создания новых материалов, обладающих оптимальными для данного узла трения характеристиками, обеспечивающими необходимый срок эксплуатации машин и механизмов, важным направлением является создание определенной организации микроструктуры методом улучшения межфазных границ, изменения концентрации и распределения дефектов, фазовых составляющих и др.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Н. Гаркунов, *Триботехника* (Москва: Машиностроение: 1989).
2. И. В. Крагельский, *Трение и износ* (Москва: Машиностроение: 1968).
3. Ю. М. Плескавский, В. Н. Савицкий, В. В. Кончиц, В. А. Барабась, *Трение и износ*, **16**, № 3: 404 (1995).
4. Г. Польцер, Ф. Майсснер, *Основы трения и изнашивания* (Москва: Маши-

- ностроение: 1984) (пер. с нем.).
5. А. С. Пронников, *Надежность машин* (Москва: Машиностроение: 1978).
 6. М. Н. Иванов, *Детали машин* (Москва: Высшая школа: 1991).
 7. М. І. Пашечко, І. В. Гурей, *Металознавство та обробка металів*, № 4: 19 (1999).
 8. В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов, *Прочность и износостойкость деталей машин* (Москва: Высшая школа: 1991).
 9. С. П. Козырев, *Гидроабразивный износ металлов при кавитации* (Москва: Машиностроение: 1971).
 10. А. С. Попов, Н. Н. Брыков, Н.С. Дмитриченко, *Износостойкость пресс-форм огнеупорного производства* (Москва: Металлургия: 1971).
 11. В. Н. Виноградов, Г. К. Шрейбер, Г.М. Сорокин, *Ударно-абразивный износ буровых долот* (Москва: Недра: 1975).
 12. В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, А. Н. Пашков, В. М. Рубарх, *Долговечность буровых долот* (Москва: Недра: 1977).
 13. Д. Н. Гаркунов, А. А. Поляков, *Повышение износостойкости деталей конструкций самолетов* (Москва: Машиностроение: 1974).
 14. М. М. Тененбаум, *Сопротивление абразивному изнашиванию* (Москва: Машиностроение: 1974).
 15. Н. Е. Денисова, В. А. Шорин, И. Н. Гонтарь, Н. И. Волчихина, *Триботехническое материаловедение и триботехнология: учебное пособие* (ред. Н. Е. Денисова) (Пенза: изд-во. Пенз. гос. ун-та: 2006).
 16. С. Баходур, *Проблемы трения и смазки*, № 2: 1 (1978).
 17. В. М. Голубец, В. В. Козуб, К. П. Табинский, *Физико-химическая механика материалов*, № 4: 73 (1975).
 18. Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, Е. С. Тарлат, *Физико-химическая механика материалов*, № 5: 57 (1977).
 19. В. М. Павліський, *Науковий вісник НАУ*, № 4: 160 (1998).
 20. К. Б. Кацов, Р. А. Хруник, *Физико-химическая механика материалов*, № 5: 90 (1979).
 21. І. С. Керницький, В. В. Козуб, М. І. Пашечко, *Вісник ДУ «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні»*, № 371: 93 (1999).
 22. В. М. Павліський, *Підвищення надійності і економічності автотракторних двигунів* (Тернопіль: Збруч: 1998).
 23. О. Я. Лизун, *Вісник ДУ «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні»*, № 371: 97 (1999).
 24. Р. А. Хруник, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, № 3: 102 (2000).
 25. Г. М. Сорокин, В. Н. Малышев, *Трение и износ*, 26, № 6: 598 (2005).
 26. И. В. Крагельский, *Трение и износ* (Москва: Машгиз: 1962).
 27. И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов, *Основы расчётов на трение и износ* (Москва: Машиностроение: 1977).
 28. Г. Фляйшер, *Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа* (Москва: Наука: 1968), С. 163.
 29. Г. Фляйшер, *Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин* (Москва: Наука: 1982), С. 285.
 30. М. М. Хрущов, М. А. Бабичев, *Абразивное изнашивание* (Москва: Наука: 1970).

31. М. М. Хрущов, М. А. Бабичев, *Исследование изнашивания металлов* (Москва: Изд. АН СССР: 1960).
32. И. И. Беркович, Д. Г. Громаковский, *Трибология* (ред. Д. Г. Громаковский) (Самара: изд-во Самар. гос. техн. ун-т: 2000).
33. Ф. П. Боуден, Д. Тейбор, *Трение и граничная смазка: Сб. статей* (ред. И. В. Крагельский) (Москва: Изд-во иностр. лит.: 1953).
34. Н. Б. Демкин, *Контактирование шероховатых поверхностей* (Москва: Наука: 1970).
35. М. В. Коровчинский, *Вопросы трения и проблемы смазки, Ч. 1.* (Москва: Наука: 1996), С. 98.
36. И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов, *Основы расчетов на трение и износ* (Москва: Машиностроение: 1977).
37. Л. С. Рапопорт, Л. М. Рыбакова, *Трение и износ*, **8**, № 5: 888 (1987).
38. Л. С. Рапопорт, Л. М. Рыбакова, *Трение и износ*, **8**, № 6: 1038 (1987).
39. О. О. Евтушенко, С. Г. Иваник, Н. В. Горбачова, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, № 6: 52 (2000).
40. Б. И. Костецкий, Н. Ф. Колесниченко, *Качество поверхности и трение в машинах* (Киев: Техника: 1969).
41. И. М. Любарский, Л. С. Палатник, *Металлофизика трения* (Москва: Металлургия: 1976).
42. В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, М. Г. Колокольников, *Абразивное изнашивание* (Москва: Машиностроение: 1990).
43. В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, *Износостойкость сталей и сплавов* (Москва: Нефть и газ: 1994).
44. М. М. Тененбаум, *Износостойкость конструкционных материалов* (Москва: Машиностроение: 1966).
45. В. Н. Кащеев, *Абразивное разрушение твердых тел* (Москва: Наука: 1970).
46. В. Н. Львов, *Основы абразивной износостойкости деталей строительных машин* (Москва: Стройиздат: 1970).
47. Xu Liquin and Kennon Noel F., *Wear*, **148**, No. 1: 101 (1991).
48. Wang Buqian, Geng Gangqiang, and Levi Alan V., *Wear*, **165**, No. 1: 25 (1993).
49. J. E. Garnham and J. H. Beupon, *Wear*, **157**, No. 1: 81 (1992).
50. Д. М. Гуреев, А. П. Сидоров, С. В. Ямщиков, *Трение и износ*, **13**, № 5: 881 (1992).
51. В. О. Титовская, Н. Н. Титовский, *Совершенствование строительных машин для условий Сибири и севера* (Красноярск: 1988), С. 87.
52. Н. В. Яблокова, *Разработка метода оценки износостойкости сталей по механическим свойствам применительно к абразивному изнашиванию* (Автореф. дис. ... канд. техн. наук) (Москва: 1984).
53. Г. М. Сорокин, *Вестник машиностроения*, № 5: 35 (1975).
54. Г. М. Сорокин, *Вестник машиностроения*, № 5: 11 (1986).
55. Г. М. Сорокин, *Вестник машиностроения*, № 11: 9 (1990).
56. Г. М. Сорокин, В. Н. Малышев, *Трение и износ*, **26**, № 6: 598 (2005).
57. Г. М. Сорокин, *Вестник машиностроения*, № 2: 10 (1995).
58. В. Дакворт, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 11: 54 (1965).
59. В. Ф. Лоскутов, М. М. Бобина, *Металознавство та обробка металів*, № 1: 46 (1995).
60. Г. М. Сорокин, Ю. В. Кривошеев, *Надежность и сертификация оборудова-*

- ния для нефти и газа, № 4: 31 (2003).
61. Г. Г. Назаров, *Исследование влияния механических свойств и энергетического состояния поверхностей сталей на характеристики трения* (Автореферат дис. ... канд. техн. наук) (Москва: 1983).
 62. Л. М. Рыбакова, Л. И. Куксенова, *Структура и износостойкость металла* (Москва: Машиностроение: 1982).
 63. Е. А. Шур, Н. Я. Бычкова, Д. П. Марков, Н. Н. Кузьмин, *Трение и износ*, **16**, № 1: 80 (1995).
 64. А. М. Вихрова, Т. В. Ларин, Ю. М. Парышев, Л. С. Хургин, *Вестник ВИИЖТ*, № 6: 34 (1983).
 65. Д. П. Марков, *Вестник ВИИЖТ*, № 3, 10 (1995).
 66. Biam Singhai, Maj Sophia, and Borland Ponglay, *Wear*, **166**, No. 1: 1 (1993).
 67. Т. В. Ларин, *Износ и пути продления службы бандажей железнодорожных колес* (Москва: Трансжелдориздат: 1958).
 68. В. Н. Виноградов, Г. М. Сорокин, В. А. Доценко, *Абразивное изнашивание бурильного инструмента* (Москва: Недра: 1980).
 69. Е. А. Шур, *Конструкционная прочность стали и термическая обработка рельсов* (Автореферат дис. ... докт. техн. наук) (Москва: 1980).
 70. И. Г. Узлов, В. К. Бабич, Н. Г. Мирошниченко, М. А. Дружинин, *Вестник ВНИИЖТ*, № 3: 43 (1978).
 71. И. Г. Узлов, *Сталь*, № 7: 648 (1971).
 72. И. Г. Узлов, С. Е. Подольский, О. Н. Перков, *Залізничний транспорт України*, № 2–3: 26 (1997).
 73. Ф. Б. Пикеринг, *Физическое металловедение и разработка стали* (Москва: Металлургия: 1982).
 74. R. Mitura, *Hutnicke actuality*, No. 7: 26 (1985).
 75. И. Г. Узлов, В. К. Бабич, Н. Г. Мирошниченко, О. М. Савчук и др., *Вестник ВНИИЖТ*, № 1: 43 (1989).
 76. P. Clayton and D. Dants, *Wear*, **135**, No. 2: 369 (1990).
 77. Я. Р. Раузин, Е. А. Шур, М. М. Носков, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 9: 20 (1969).
 78. И. И. Цыпин, В. И. Конторович, Д. Д. Зуев, В. А. Гольдштейн, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 10: 26 (1991).
 79. В. В. Владимирова, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 10: 4 (1992).
 80. А. А. Мухамедов, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 7: 31 (1968).
 81. С. М. Шамахсудов, *Термическая обработка и сварка металлов*, № 192: 12 (1977).
 82. А. А. Мухамедов, С. М. Шамахсудов, *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*, № 7: 115 (1979).
 83. М. М. Мирсолиев, А. А. Мухамедов, С. М. Шамахсудов, *Доклады АН УзССР*, № 11, 19 (1980).
 84. А. А. Мухамедов, *Термическая обработка, сварка и свойства металлов*, № 297: 3 (1980).
 85. С. У. Алимов, М. М. Мирсолиев, *Литейное производство, термическая обработка и износостойкость сталей и сплавов*, № 320: 14 (1981).
 86. А. А. Мухамедов, *Литейное производство, термическая обработка и износостойкость сталей и сплавов*, № 320: 2 (1981).

87. В. В. Баранов, В. Б. Беляев, В. М. Власов, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, № 6: 70 (1992).
88. T. Chandrasekaran, K. A. Natarajan, and W. Kishore, *Wear*, **147**, No. 2: 267 (1991).
89. А. А. Батаев, Л. И. Тушинский, В. А. Батаев, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 6: 25 (1996).
90. Wang You, *Chin. J. Mech. Eng.*, **28**, No. 2: 39 (1992).
91. Т. А. Михайличенко, Д. И. Тараско, *Труды Всесоюзной научно-технической конференции «Новые материалы, ресурсосберегающие технологии и химико-термическая обработка в машиностроении и металлургии»* (Новокузнецк: 1991), с. 20.
92. С. М. Шахмаскудов, Т. А. Мухамедов, *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*, № 2: 68 (1990).
93. В. Р. Назаренко, В. Ф. Янковый, М. А. Долинская, П. М. Яковенко, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 6: 32 (1992).
94. М. П. Шебатинов, Ю. Е. Абраменко, Н. И. Бех, *Высокопрочностной чугуны в автомобилестроении* (Москва: Машиностроение: 1988).
95. Д. П. Марков, *Вестник ВИИЖТ*, № 2: 28 (1994).
96. А. В. Корзников, И. М. Сафаров, Р. Э. Валиев, Б. М. Бронфин и др., *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 2: 27 (1993).
97. Г. А. Салищев, Б. А. Сугубеков, К. Г. Фархутдинов, Ф. А. Файрулин *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 5: 7 (1995).
98. И. В. Кабанов, И. Н. Мелькумов, Т. Б. Мочалова, С. Б. Масленков и др., *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 6: 37 (1990).
99. Р. В. Херцберг, *Деформация и механика разрушения конструкционных материалов* (Москва: Металлургия: 1989).
100. Л. К. Гордиенко, *Субструктурное упрочнение металлов и сплавов* (Москва: Наука: 1973).
101. Г. А. Островский, В. И. Саррак, К. З. Шепеляковский, Р. И. Энтин, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 6: 56 (1967).
102. И. Н. Кидин, *Термическая обработка стали при индукционном нагреве* (Москва: Металлургия: 1950).
103. И. Н. Кидин, *Физические основы электротермической обработки металлов и сплавов* (Москва: Металлургия: 1969).
104. Д. Мак-Лин, *Механические свойства металлов* (Москва: Металлургия: 1965).
105. В. В. Калмыков, И. Г. Узлов, И. Я. Раздобреев, И. Я. Гречная, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, № 2: 119 (1999).
106. Б. Б. Винокур, *Карбидные превращения в конструкционных сталях* (Киев: Наукова думка: 1988).
107. А. Амулявичус, М. Бальчюнянс, П. Перретис, Д. Юзакенас, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 1: 12 (1994).
108. *Справочник по триботехнике (в 3 т.). Т. 1. Теоретические основы* (ред. М. Хебда и А. В. Чичинадзе) (Москва: Машиностроение: 1989).
109. Б. И. Вороненко, *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 8: 12 (1996).
110. С. А. Герасимов, С. Д. Карпухин, В. К. Кучерявый, Э. Д. Елисеев и др., *Металловедение и термическая обработка металлов*, № 6: 13 (1994).
111. В. І. Ульшин, *Металознавство та обробка металів*, № 1: 27 (1995).

112. А. В. Поліщук, *Металознавство та обробка металів*, № 1–2: 88 (1999).
113. А. С. Шейн, И. Н. Веселов, *Трение и износ*, **8**, № 1: 178 (1987).
114. О. А. Кузін, С. А. Беспалов, *Вісник ДУ «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні»*, № 371: 49 (1999).
115. В. В. Летуновский, *Физико-механические и эксплуатационные свойства инструментальных и конструкционных материалов* (Красноярск: 1976), С. 63.
116. *Сверхмелкое зерно в металлах: Сб. статей* (ред. Л. К. Гордиенко) (Москва: Металлургия: 1973) (пер. с англ.).
117. Ю. М. Коровайченко, *Вісник ДУ «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні»*, № 371: 116 (1999).
118. О. А. Кузін, С. А. Беспалов, *Вісник ДУ «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні»*, № 412: 114 (2000)
119. О. А. Кузін, С. А. Беспалов, П. Ю. Волосевич, Ю. А. Гарасим, *Вісник НУ «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні і приладобудуванні»*, № 422: 104 (2001).
120. О. А. Кузін, С. А. Беспалов, Т. М. Мещерякова, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, № 3: 91 (2001).
121. Ф. К. Ткаченко, А. М. Плевич, В. Г. Ефременко, В. А. Русецкий, *О механизмах изнашивания двухфазных сплавов абразивными частицами* (Мариуполь: Мариупольский металлург. ин-т: 1990) (Деп. В УкрНИИНТИ 08.06.90, №994 – Ук90). 13с.
122. Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, *Износостойкость и антифрикционность деталей машин* (Киев: Техника: 1965).
123. П. Ю. Волосевич, С. А. Беспалов, *Металлофизика и новейшие технологии*, **24**, № 11: 1573 (2002).
124. А. И. Шпагин, *Антифрикционные сплавы* (Москва: Металлургиздат: 1956).
125. А. А. Жуков, Г. И. Сильман, М. С. Фрольцов, *Износостойкие отливки из комплексно-легированных чугунов* (Москва: Машиностроение: 1984).
126. В. П. Половинчук, О. В. Сенченко, *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6: 70 (1999).
127. М. І. Пашечко, *Проблеми трибології*, № 2: 31 (1997).
128. Э. С. Бройде, М. Л. Ларин, Е. А. Марченко, *Трение и износ*, **18**, № 2: 213 (1997).
129. Г. А. Баглюк, Л. А. Позняк, *Порошковая металлургия*, № 1–2: 44 (2001).
130. Г. А. Баглюк, Л. А. Позняк, *Порошковая металлургия*, № 3–4: 94 (2001).
131. Н. М. Русин, А. П. Савицкий, Л. И. Тушинский, *Трение и износ*, **19**, № 3: 391 (1998).
132. П. Ю. Волосевич, С. А. Беспалов, *Металлофиз. новейшие технол.*, **26**, № 5: 691 (2004).
133. П. Ю. Волосевич, С. А. Беспалов, *Металлофиз. новейшие технол.*, **27**, № 6: 841 (2005).
134. П. Ю. Волосевич, С. А. Беспалов, *Металознавство та обробка металів*, № 2: 37 (2006).