

УДК 620.22

ПОВЕРХНОСТНОЕ И ОБЪЕМНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ИХ СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ И УЛУЧШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

*А.А. Дюжев, А.А. Шипко, С.П. Руденко, А.И. Комаров,
А.В. Толстой, С.Г. Сандомирский, В.Е. Антонюк*

В прошлом году исполнилось 55 лет со дня основания нашего института. Сегодня в Государственном научном учреждении «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» работает более 300 человек. Это самый крупный центр машиноведения страны, обладающий разносторонним научным потенциалом, развивающий востребованные промышленностью научные направления, тесно работающий в партнерстве с институтами и промышленными предприятиями. Здесь развиваются теория надежности технических систем, методы прогнозирования ресурса конструкций и вибродиагностирования элементов трансмиссий, технологии упрочнения и создания новых конструкционных материалов; компьютерные технологии виртуального проектирования, дизайна и испытаний машин; совместно с ОАО «БелАЗ» развиваются принципы и методологические основы создания карьерных самосвалов, действует и созданный Институтом Республиканский полигон для испытаний мобильных машин. Перспективы развития Объединенного института машиностроения мы связываем с дальнейшим развитием востребованных научных школ, улучшением и совершенствованием координации работ с академическими институтами родственного профиля, достижения на новом уровне партнерства с отечественными и зарубежными предприятиями, созданием собственной стендовой базы

и энергоэффективных производств, увеличение эффективности патентно-лицензионной работы, развитием нормативно-правовой базы при создании наукоемкой научно-технической продукции.

Для начала знакомства с читателями журнала «Инженер-механик» мы представляем одну из крупнейших лабораторий Института — лабораторию металлургии в машиностроении, руководит которой д.т.н., профессор Шипко Алексей Алексеевич. Эта лаборатория выполняет функции Объединенного института машиностроения НАН Беларуси, как головного института по ГПНИ (подпрограмме) «Металлургия», а также по организации научного обеспечения технического переоснащения и модернизации литейных, термических, гальванических и других энергоемких производств республики. В этой лаборатории развиваются направления, вынесенные в заголовок настоящей статьи. Остановимся на некоторых из них.

1. Упрочнение и структурно-фазовые превращения при ХТО зубчатых колес из сталей заданных химсостава и прокаливаемости; исследование их выносливости при изгибе, глущинной контактной усталости и работоспособности в целом.

Уже более 30 лет под руководством сначала к.т.н. Анатолия Аркадьевича Сусина, а в последние 5 лет под руководством к.т.н. Сергея Петровича Руденко, развивается комплекс работ

по выработке критериев работоспособности зубчатых колес автотракторной техники, созданию методик расчета и проектирования их долговечности, проектированию современных промышленных технологий химико-термического упрочнения этих ответственных деталей энергонасыщенных машин [например, 1–3].

Главное здесь состоит в том, что для достижения предельно высокого уровня эксплуатационных характеристик таких наиболее массовых и ответственных деталей трансмиссий как зубчатые колеса, требуется учитывать всю цепочку технологических факторов — от технологии выплавки, химического состава сталей, их пластической деформации, механической обработки заготовок до термической, химико-термической и финишной операций. При этом структурные и фазовые превращения, напряженное состояние определяют уровень сопротивления изгибной и контактной усталости. Даже незначительное отклонение от оптимальной структуры зубчатых колес, требуемой твердости и эффективной толщины цементованного слоя приводят к существенному снижению их долговечности.

Вместе с тем, несмотря на наличие на многих предприятиях машиностроения современных агрегатов химико-термической обработки с высоким уровнем автоматизации, имеется большой разброс прочностных и усталостных характеристик обрабатываемых деталей. Это вызывает необходимость уточнения нормативных документов по контролю качества упрочненных зубчатых колес.

Например, нарушение технологических параметров (температуры нагрева, величины углеродного потенциала), приводящее к выделению в

мартенситной матрице только до 10 % бейнитной фазы приводит к снижению долговечности зубчатых колес в 2 раза, а до 20 % глобулярных карбидов — в 1,5–3 раза.

Для дифференцированного выявления структурных составляющих с близкими физико-механическими свойствами в лаборатории разработаны специальные металлографические реактивы, позволяющие с высокой точностью идентифицировать карбидную, мартенситную и бейнитную фазы, а также остаточный аустенит. Например, рис. 1.

На основе проведенных исследований по идентификации структурных характеристик, определения критериев работоспособности зубчатых колес, их сопротивления усталости, экспериментального и расчетного определения прокаливаемости цементуемых сталей и упрочненных слоев, предложенной методики расчета зубчатых колес на глубинную контактную выносливость, в лаборатории созданы программные средства компьютерного проектирования зубчатых передач заданной долговечности, расчета прокаливаемости стали, моделирования процессов диффузии углерода в поверхностных слоях цементуемых деталей и расчета параметров химико-термического упрочнения (рис. 2–5).

При использовании приведенных программных пакетов достигается экономия энергоресурсов до 25 % за счет сокращения времени на проведение прецизионной и высокоэффективной химико-термической обработки; снижение всех видов затрат и процента брака; повышение качества продукции в 1,5 раза выше гарантированно-го ресурса деталей.

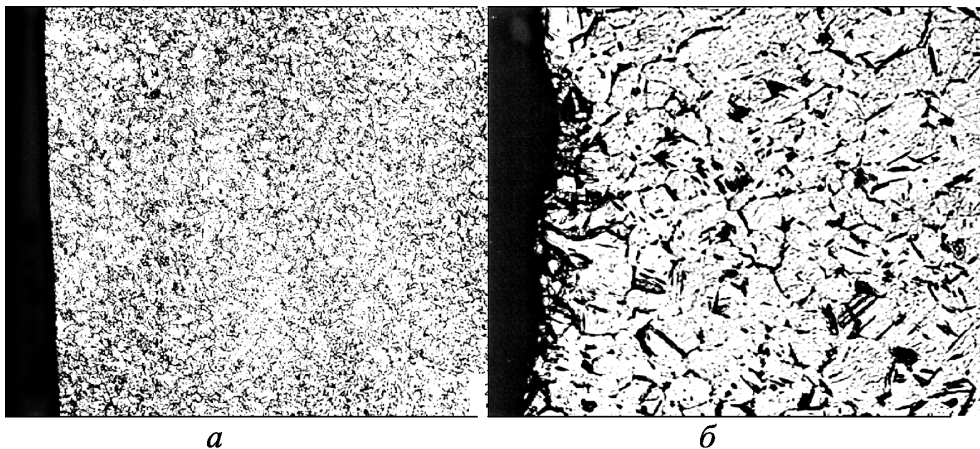


Рис. 1. Микроструктура цементованного слоя:
а — не содержащая продукты немартенситного превращения;
б — с включениями пластинчатого бейнита

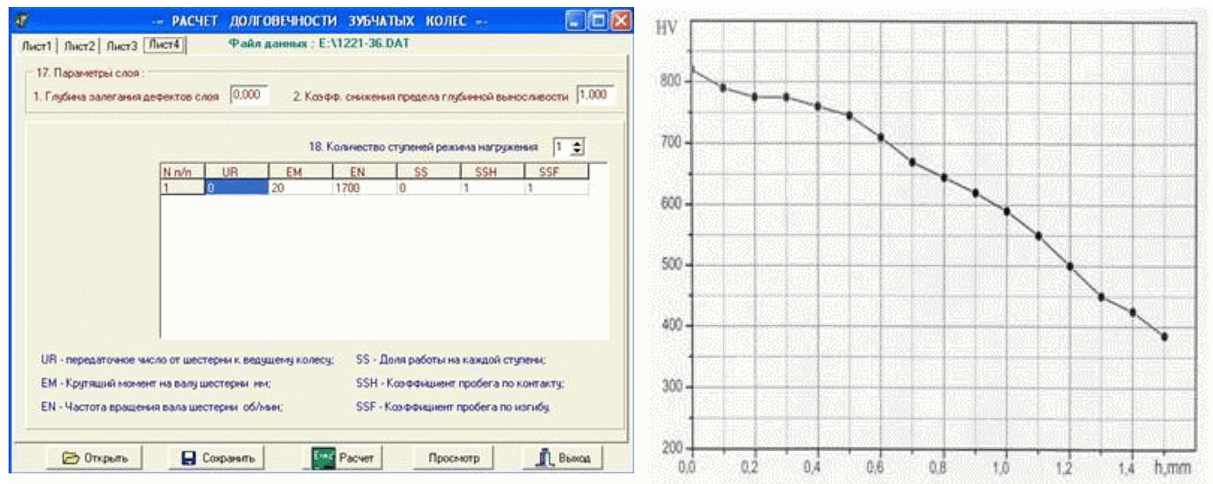


Рис. 2. Программный пакет «GearProg». Предназначен для расчета ресурса зубчатых колес трансмиссий, величины микротвердости и ее распределения по упрочненному слою

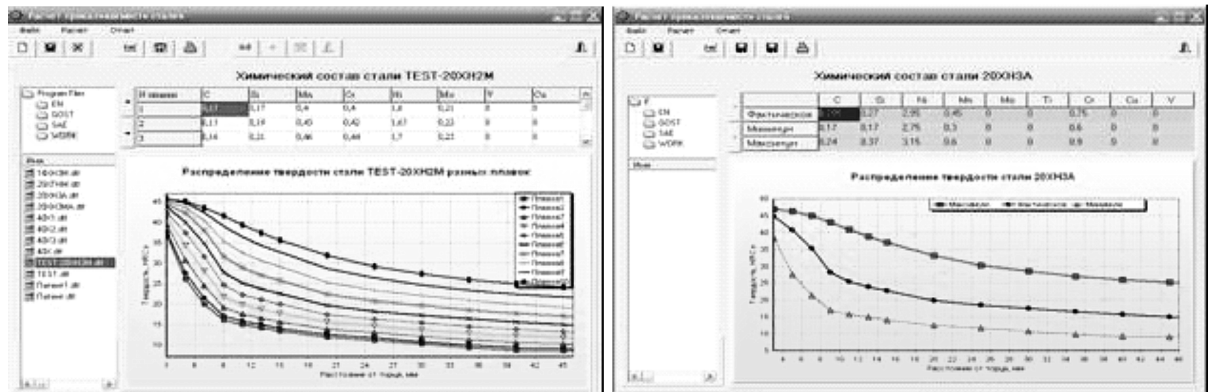


Рис. 3. Программный пакет «SteelPro». Рассчитывает прокаливаемость стали в зависимости от величины зерна аустенита и химического состава стали. Расчет основан на определении идеального критического диаметра и величины микротвердости с учетом делительных коэффициентов на заданном расстоянии от поверхности детали

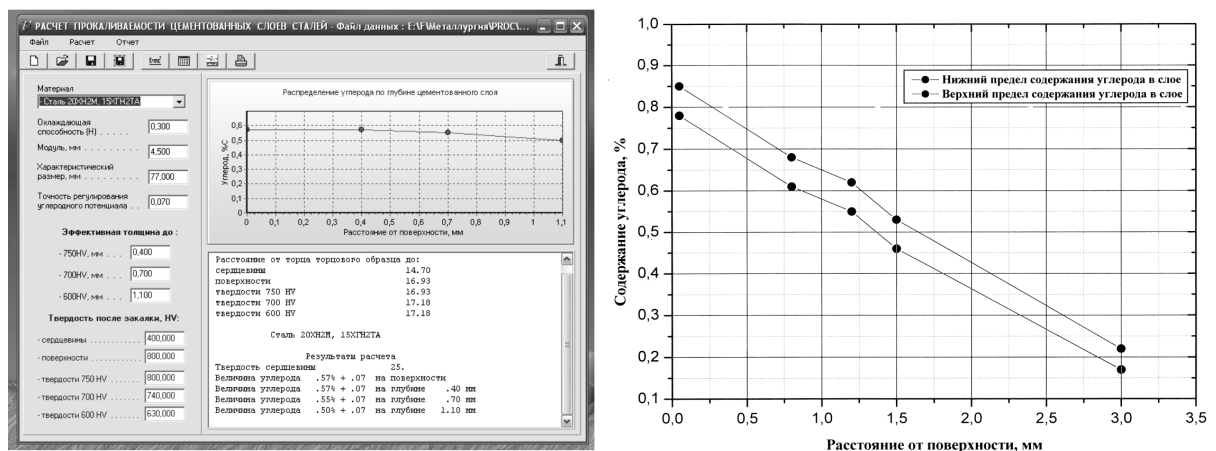


Рис. 4. Программный пакет «Carb». Рассчитывает распределение углерода по глубине упрочняемого слоя с учетом прокаливаемости стали, условий охлаждения деталей при закалке, размера и формы зубчатых колес

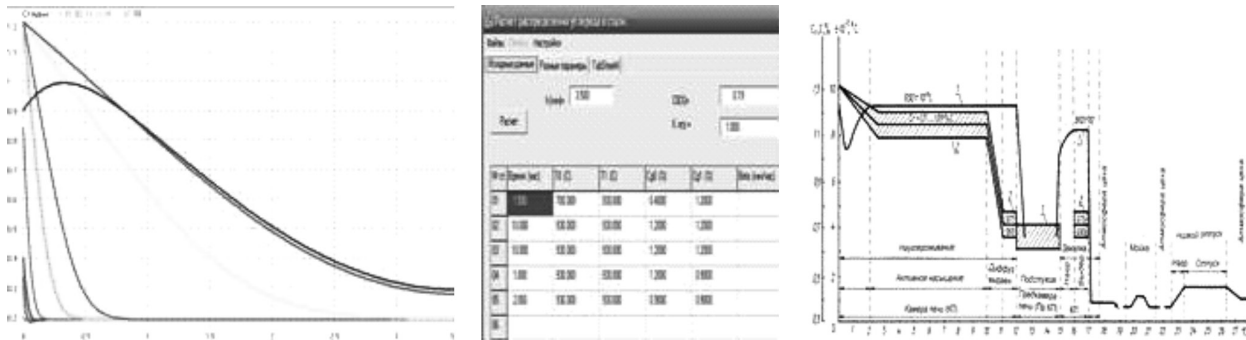


Рис. 5. Программный пакет «RegHard». Рассчитывает технологические параметры процесса цементации конструкционных сталей, обеспечивающие заданное распределение углерода, на основе моделирования процессов диффузии углерода в стали с учетом коэффициентов массопереноса, величины и точности регулирования углеродного потенциала печной атмосферы

Технология соответствует лучшим мировым аналогам, например, фирм «Катерпиллер», «Мерседес-Бенц», «Вольво», «Комацу», «Юнит-Риг» и др.

В результате многолетней работы разработана методология проектирования высокоэффективных технологических процессов упрочнения зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин, которая позволяет на стадии проектирования зубчатых передач назначать марку стали, технические требования к эффективной толщине и качеству микроструктуры упрочненных слоев, рациональные параметры ХТО и регламентируемую долговечность высоконапряженных зубчатых колес. По этим проблемам в рамках государственных научно-технических программ, программ научных исследований, договоров о сотрудничестве ведутся работы с БелАЗом, МТЗ, МАЗом, МЗКТ.

Предлагается дальнейшее расширение работ по мониторингу действующих на предприятиях Беларуси, России агрегатов и технологий химико-термического упрочнения зубчатых колес из сталей различных марок, корректировке технологических параметров с целью удешевления производства и повышения срока службы обрабатываемых деталей.

2. Объемное и поверхностное модифицирование алюминиевых сплавов.

Руководят этими работами к.т.н. Александр Иванович Комаров и к.ф.-м.н. Валентина Иосифовна Комарова. В результате многолетних исследований решены важные для материаловедения и практического использования задачи значительного повышения износоустойчивости

и улучшения структурно-фазовых характеристик сплавов на основе алюминия. Так, завершен комплекс работ по установлению природы воздействия частиц углеродных наноматериалов (углеродных нанотрубок, фуллеренсодержащих форм, аморфного углерода), включенных в виде добавок в керамическую матрицу структурных модификаций α -, γ - Al_2O_3 , сформированную методом микродугового оксидирования, на трибоформирование антифрикционных, износостойких слоев на поверхности керамики. Впервые выявлены особенности трибоформирования под воздействием углеродных наночастиц структуры поверхности трения, заключающиеся в образовании специфических наноструктур (20–30 нм) на основе углерода, обеспечивающих многократное (до 10 раз) повышение износоустойчивости при одновременном снижении коэффициента трения в 2,5–8 раз, значительном расширении диапазона рабочих нагрузок (рис. 6, 7) [4].

Для решения задачи объемного упрочнения алюминиевых сплавов разработаны физико-химические принципы создания алюмоматричных композитов путем целенаправленного армирования сплавов, в том числе промышленных силуминов системы Al – Si – Cu – Mg – Ni тугоплавкими полифункциональными наноструктурированными наполнителями на основе микро- и ультрадисперсных порошков оксидов и нитридов, выполняющих, с одной стороны, функцию доноров для протекания на их поверхности реакций, приводящих к образованию наноразмерных соединений и элементов, с другой — носителей этих наноконпонетов в расплав, обеспечивая при этом их равномерное распределение в алюминиевой матрице.

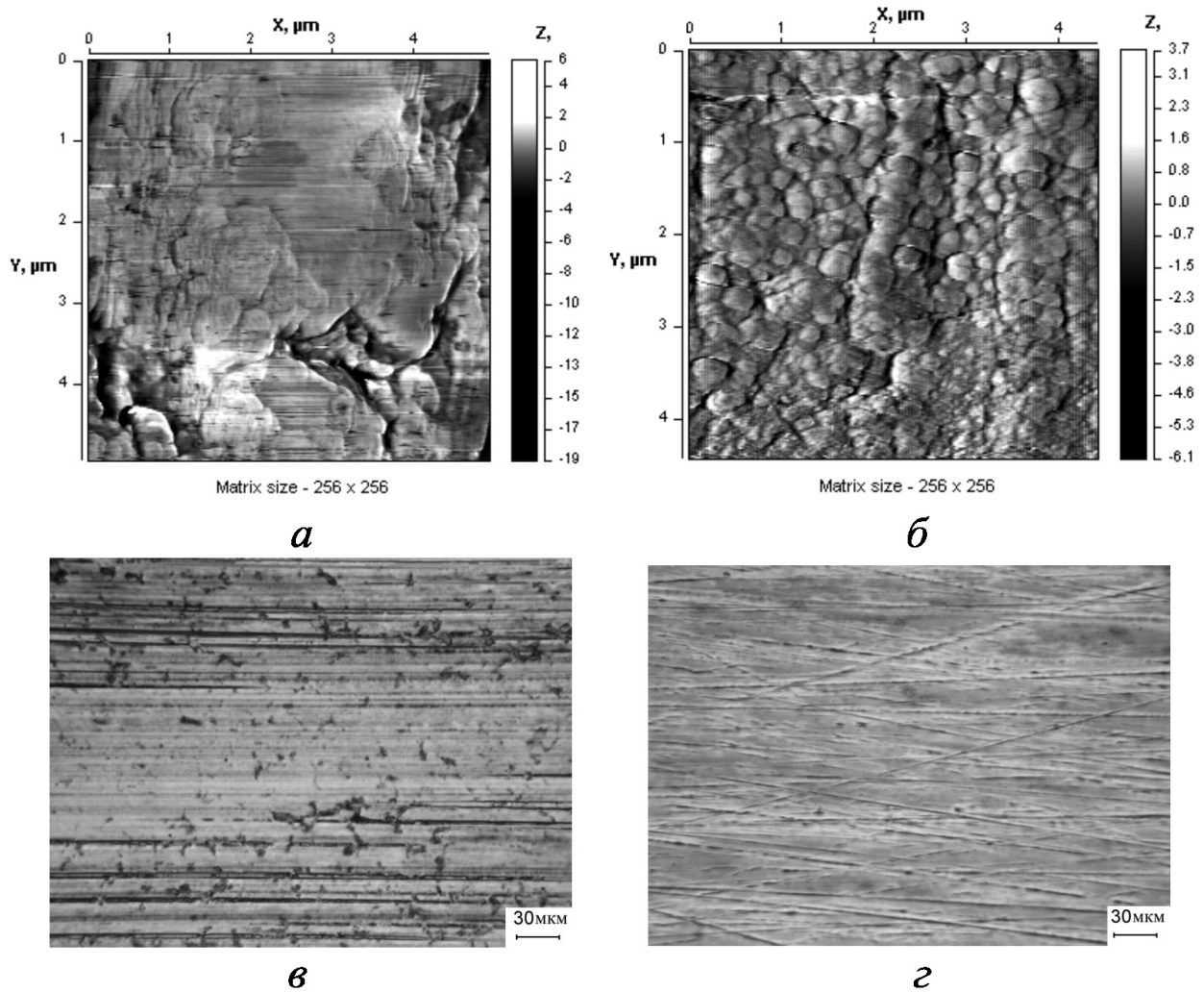


Рис. 6. АСМ-изображение (а, б) и микроструктура (в, з) поверхности трения немодифицированного (а, в) и модифицированного фуллеренами C_{60} керамического покрытия

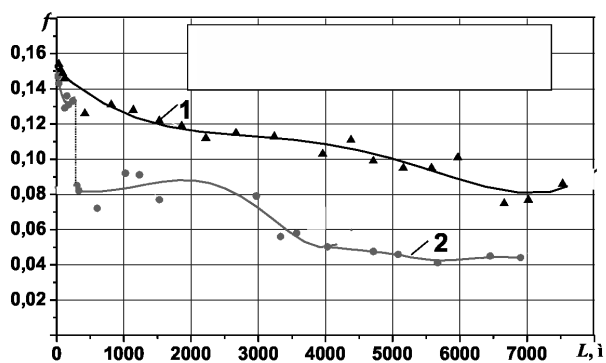


Рис. 7. Зависимость коэффициента трения от продолжительности испытаний немодифицированного (1) и модифицированного фуллеренами C_{60} (2) керамического покрытия

Разработан новый процесс самопроизвольного синтеза керамических тугоплавких наночастиц непосредственно в алюминиевых расплавах вследствие реакций с компонентами наноструктурированного наполнителя. Этот процесс характеризуется высокой эффективностью ввода наноразмерных керамических соединений в расплавы за счет смачиваемости матричным алюминиевым расплавом армирующих фаз, стойкости к образованию агрегатов частиц наполнителя, их равномерного распределения в расплаве. Показана высокая эффективность разработанного способа. В частности, при модифицировании эвтектического силумина АК12М2МгН наноструктурированным наполнителем на основе ультрадисперсного порошка диоксида кремния достигнут дисперги-

рующий эффект интерметаллидных фаз, размера зерен α -фазы, измельчение эвтектики силумина в 20–30 раз. Это обеспечило повышение трибомеханических свойств в 1,5–5 раз при одновременном расширении диапазона рабочих нагрузок не менее 2 раз (рис. 8, 9) [5–6].

Полученные результаты применены для упрочнения узлов трения различного назначения применены (рис. 10). Установлено, что при упрочнении разработанным керамическим покрытием рабочих поверхностей ползушек дорогостоящего технологического оборудования ЗАО «АТЛАНТ» достигнуто повышение его срока эксплуатации более чем в 10 раз, при этом экономический эффект составляет не менее 36 млн рублей на один комплект вакуум-формы. В настоящее время этим предприятием проводится переоснащение линий серийного производства с использованием деталей вакуум-форм с керамическим покрытием. На ОАО «Полоцк-Стекловолокно» упрочнены

керамическим покрытием запорные кольца оборудования для производства стекловолокна, которые замещают аналогичные детали производства Германии. Осуществлена замена шаров запорной газовой арматуры, изготавливаемых из дорогостоящей нержавеющей стали, на шары из сплавов алюминия с керамическим покрытием, что обеспечивает значительное повышение износостойкости этих деталей при одновременном снижении массы. Подобные работы проводятся и с рядом других белорусских предприятий (рис. 10).

3. Технологии и оборудование индукционного нагрева изделий и полуфабрикатов

Эти работы Объединенный институт машиностроения проводит совместно с Физико-техническим институтом НАН Беларуси и Белорусским национальным техническим университетом. Руководят работами — д.т.н. Павел Семенович Гурченко, к.т.н. Анатолий Игнатьевич Михлюк, к.ф.-м.н. Александр Владимирович Толстой.

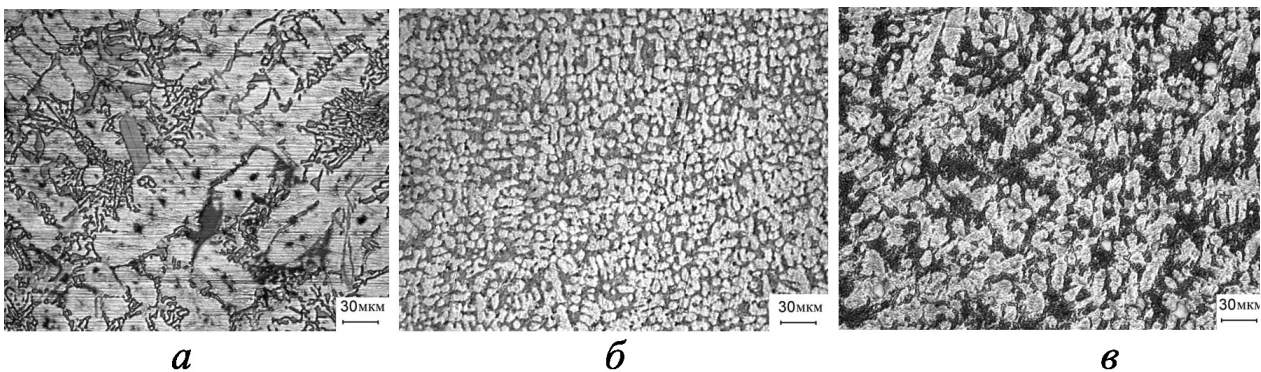


Рис. 8. Микроструктура сплава АК12М2МgН в состоянии поставки (а), модифицированного наноструктурированным наполнителем на основе ультрадисперсного диоксида кремния (б) и нитрида бора (в)

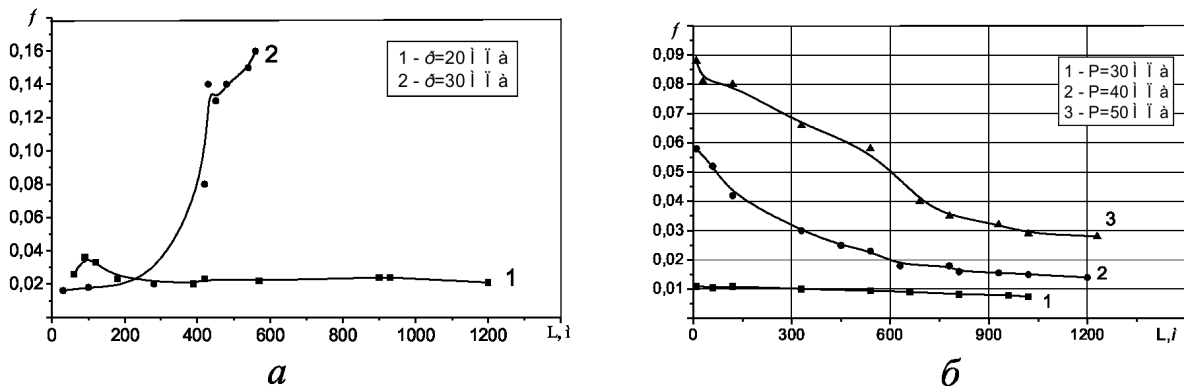


Рис. 9. Зависимость коэффициента трения от продолжительности испытаний немодифицированного сплава АК12М2МgН (а) и модифицированного наноструктурированным наполнителем на основе нитрида бора (б)

В качестве примеров выполненных работ можно привести внедренный в 90-х гг. технологический процесс и оборудование скоростной нитроцементации при индукционном нагреве пальцев рессоры и пальцев реактивной штанги автомобилей МАЗ, позволившие с 6 ч до 3 мин сократить длительность цикла упрочнения и в 1,6–2,5 раза увеличить срок службы деталей; а также процесс и обо-

рудование объемно-поверхностной закалки сложнопрофильных шестерен и сателлитов колесной передачи ведущих мостов автомобилей, позволивших резко сократить продолжительность процесса, в 11,5 раз уменьшить потребление электроэнергии. Одновременно, за счет применения для изготовления этих деталей более дешевых сталей, в 2,4 раза уменьшились затраты на их приобретение (рис. 11).

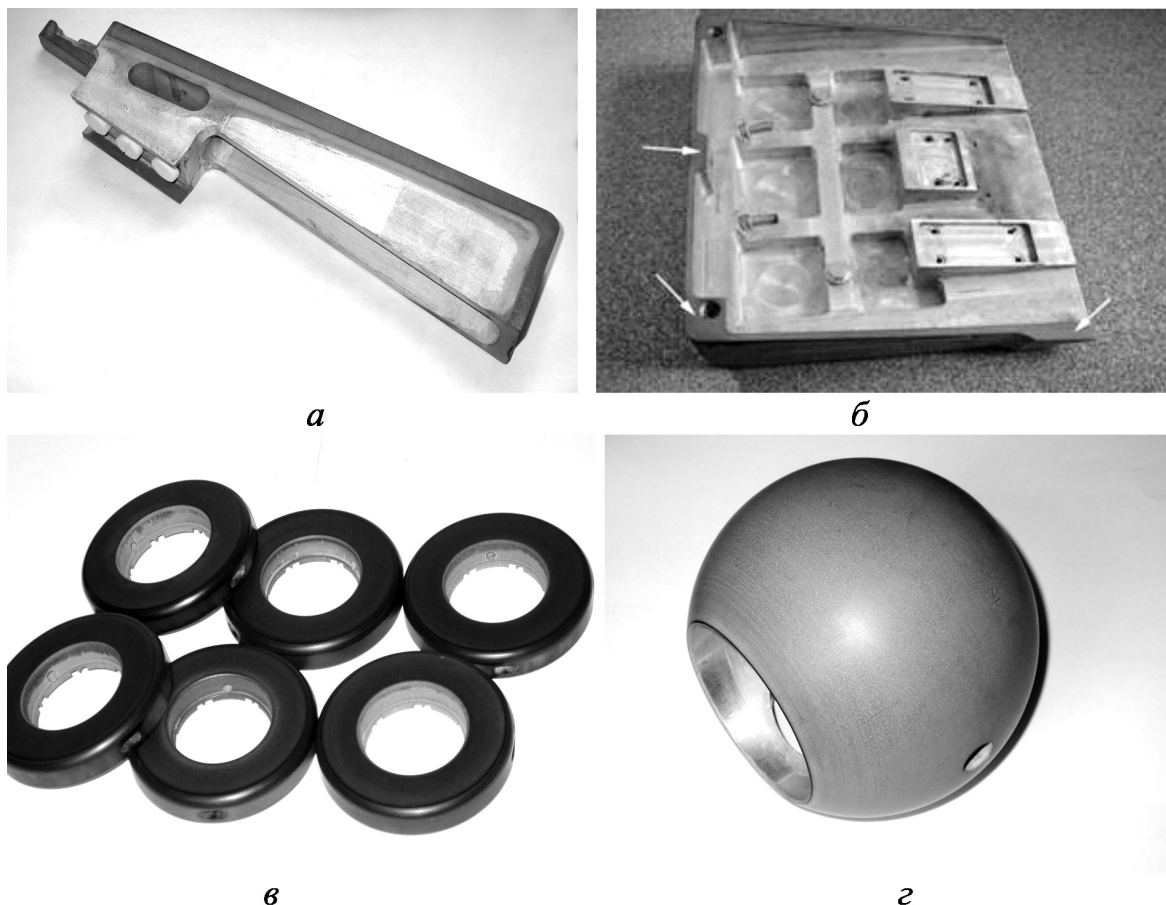


Рис. 10. Детали, упрочненные модифицированными углеродными наночастицами керамическим покрытием: а, б — подвижные вставки вакуум-форм для изготовления крупногабаритных полимерных комплектующих холодильников ЗАО «Атлант»; в — запорные кольца технологического оборудования ОАО «Полоцк-Стекловолокно»; г — шар газового крана РУП «Белгазтехника»

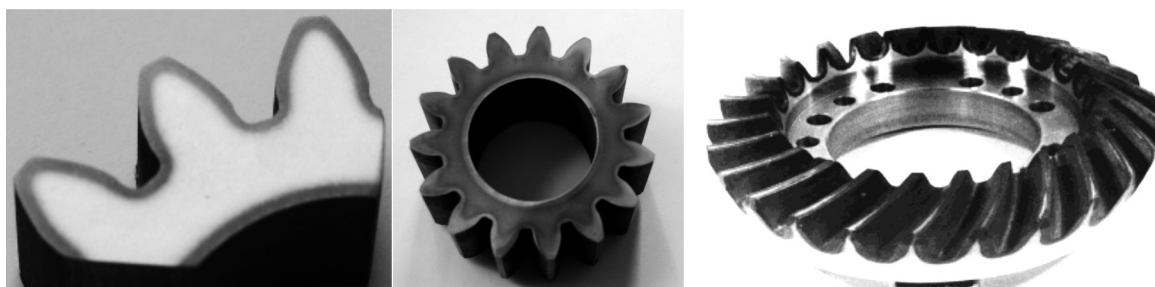


Рис. 11. Общий вид шестерен, упрочненных объемно-поверхностной закалкой с ТВЧ нагревом

Еще одним примером является разработанная и внедренная в производство технология и оборудование индукционной термообработки стальной литой дроби. Общий вид участка термообработки дроби на ОАО «МАЗ» показан на рис. 12.

Использование этого процесса позволило в 3 раза повысить стойкость дроби. Исследованы структура и свойства дроби, закаленной из расплава и подвергнутой термообработке. После термообработки дробь имеет структуру троостомартенсита твердостью 350–550 HV. По границам зерна мартенсит имеет значительную степень аморфизации. В литом состоянии структура гранул имеет дендритное строение в виде удлиненных кристаллов размером 13–40 мкм. Твердость в этом состоянии — 600–800 HV.

Работы последних лет — это разработка технологии и оборудования индукционного нагрева длинномерных деталей автомобилей, в частности, нормализации стальных прямоугольных труб каркасов автобусов, концевого ТВЧ нагрева деталей полуфабрикатов под ковку и штамповку и др.

Применение индукционного нагрева вместо печного позволяет в десятки раз сократить длительность процесса нагрева одной детали, в 3–4 раза снизить затраты электроэнергии. Отпадает необходимость использования природного газа, минеральных масел, огнеупорных материалов, асбеста; устраняются выбросы в окружающую среду вредных веществ и продуктов их распада. При нагреве под пластическую деформацию решающие преимущества заключаются в отсутствии окалины и угара, высокой культуре производства. В качестве примера можно привести следующие публикации [7–9].

Требуется расширение практического использования технологий индукционного нагрева. В настоящее время возглавил эти работы Физико-технический институт НАН Беларуси, в котором образован Центр индукционных технологий. Это подразделение специализируется не только на создании установок индукционного нагрева, но также на изготовлении современных генераторов для этих установок. Работами руководят академик Гордиенко Анатолий Илларионович и к.т.н. Вегера Иван Иванович.

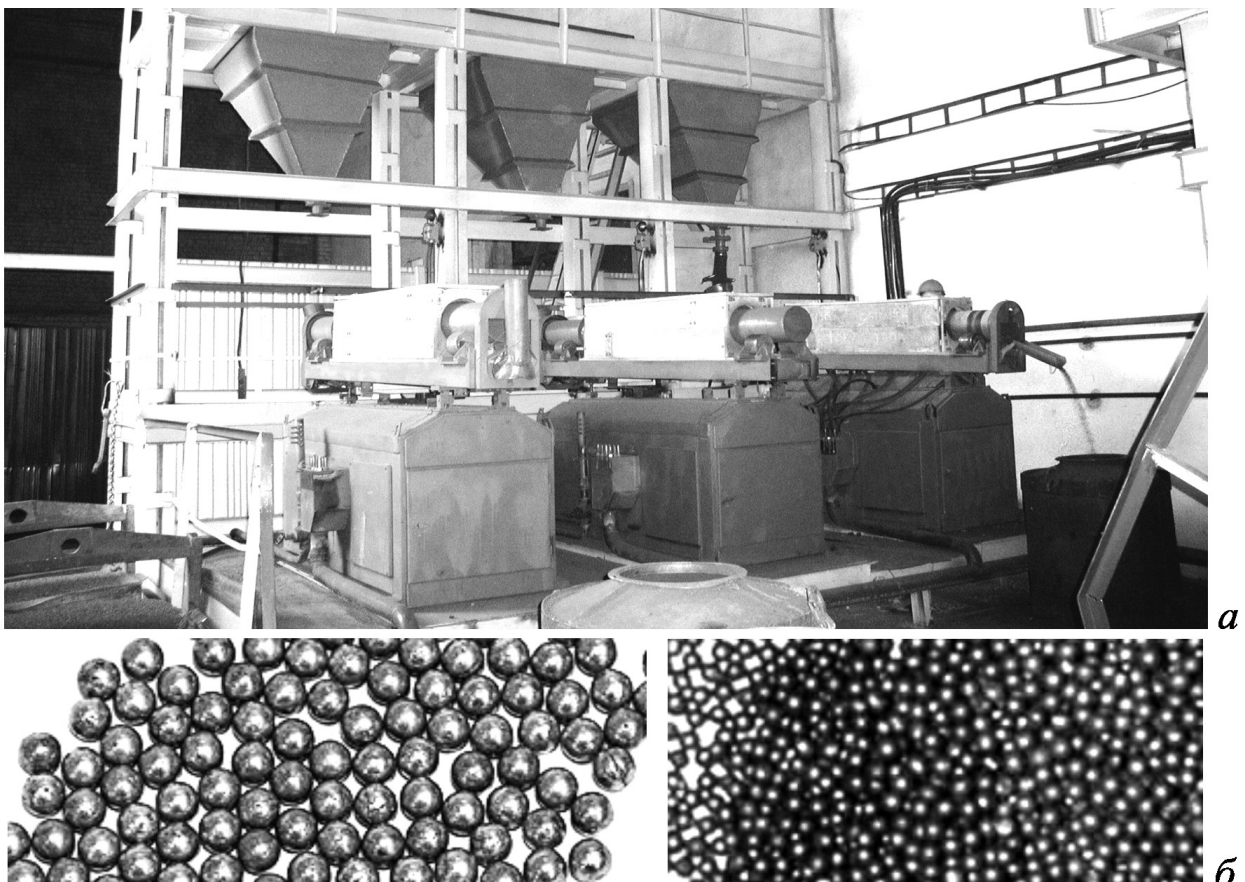


Рис. 12. Общий вид участка (а) и термообработанная стальная дробь различной фракции (б)

4. Магнитная структуроскопия изделий из сталей и чугунов.

Работы ведутся под руководством доктора технических наук Сандомирского Сергея Григорьевича. Исследования направлены на анализ особенностей связи структуры и фазового состава, физико-механических свойств сталей и чугунов с их магнитными параметрами. За последние годы получены аналитические выражения для расчета релаксационных магнитных параметров сталей по параметрам предельной петли гистерезиса, оценки максимальной магнитной проницаемости сталей и чугунов по коэрцитивной силе, расчета поля максимальной магнитной проницаемости сталей и погрешности ее измерения, формулы для расчета остаточной намагниченности сталей как среднего значения достоверного диапазона ее изменения. Установленные закономерности позволяют разрабатывать достоверные и высокопроизводительные методы контроля качества структуры стальных и чугунных изделий, в том числе движущихся в процессе производства. За последние 5 лет только в Российских научных журналах «Металлы», «Заводская лаборатория. Диагностика материалов», «Измерительная техника», «Метрология», «Деформация и разрушение материалов», «Электричество», «Электротехника», «Металлургия машиностроения», «Контроль. Диагностика», «Сталь» и других опубликовано более 40 статей (например [10, 11]), многие из которых изданы и на английском

языке. Получено 20 авторских свидетельств на изобретения и полезные модели. Опубликована монография [12].

Результаты научных исследований и технические решения по обеспечению заданной структуры необточенных отливок ниппелей из ковкого чугуна переданы на Минский завод отопительного оборудования по лицензионным договорам и внедрены в цехе ковкого и серого чугуна МЗОО в составе автоматизированной линии контроля и автоматической разбраковки по обрабатываемости необточенных отливок ниппелей из ковкого чугуна КЧ 30-6 (рис. 13). Эксплуатация линии повысила рентабельность производства ниппелей, обеспечила потребность завода, позволила отказаться от замены чугунных ниппелей на импортные стальные, обеспечить их экспортные поставки.

Разработана, передана по лицензионным договорам на филиал ОАО «Минский моторный завод» в г. Столбцы и внедрена в производство методика контроля механических свойств термообрабатываемых болтов дизельных двигателей. Применение методики, реализуемой разработанным прибором МАКСИ-У (Универсальный), гарантирует заданный предел прочности болтов, повышает надежность всех выпускаемых Минским моторным заводом дизельных двигателей (рис. 14). Ее использование приносит и непосредственный экономический эффект заводу — в производство возвращены тысячи дорогостоящих ответственных болтов.



Рис.13. Автоматизированная линия контроля и автоматической разбраковки по обрабатываемости не обточенных отливок ниппелей из ковкого чугуна КЧ 30-6



Рис.14. Внешний вид электронного блока прибора МАКСИ-У и контролируемых болтов различных типов

Разработанная методика магнитного контроля толщины поверхностно-упрочненных слоев протяженных изделий передана ОАО «Минский моторный завод» и внедрена в автоматном цехе ОАО «Минский моторный завод», филиал в г. Столбцы. Повышение достоверности контроля достигается благодаря тому, что информационный параметр методики при высокой чувствительности к толщине поверхностно-упрочненного слоя практически не подвержен влиянию нестабильности положения изделий при намагничивании и измерении. Применение методики предотвратило попадание на сборочный конвейер Минского моторного завода ответственных осей с низким уровнем механических свойств, повысило надежность всех выпускаемых заводом дизельных двигателей.

5. Исследование и разработка технологических основ кольцераскатки деталей типа профильных колец.

На предприятиях Беларуси (изготавливается более 200 наименований деталей типа колец) при годовой программе около 160000 штук — подшипники на Минском подшипниковом заводе, коронные шестерни планетарных передач на Минском тракторном, Минском автомобильном и Белорусском автомобильном заводах и Минском заводе колесных тягачей, специальные подшипники и колесные диски на Белорусском автомобильном заводе. Для изготовления колец используется ежегодно около 12000 т высоколегированных сталей, однако коэффициент использования металла составляет не более 0,6.

Зарубежное машиностроение для изготовления кольцевых заготовок успешно использует

кольцераскатные станы с ЧПУ, которые обеспечивают высокую и стабильную точность, минимальные припуски под последующую обработку, позволяют легко переналаживаться на изготовление различных типов колец (рис. 15), учитывают свойства материала колец и с помощью программного обеспечения корректируют режимы раскатки.

Для решения этой проблемы необходима не только закупка современного оборудования, но и разработка научных основ технологии кольцераскатки.

Предполагается, что внедрение кольцераскатки на МПЗ и БелАЗе позволит увеличить коэффициент использования металла с 0,6 до 0,71–0,77, снизить годовую потребность в закупке высоколегированных сталей примерно на 3500 тонн, снизить энергозатраты при изготовлении заготовок колец на 10–15 %, ликвидировать необходимость приобретения крупногабаритных заготовок за рубежом, в результате повысить конкурентоспособность белорусских подшипников и карьерных самосвалов. Выполняемые в Объединенном институте машиностроения исследования по разработке технологических основ кольцераскатки направлены на научное сопровождение внедрения кольцераскатки, оказание методической и практической помощи предприятиям в закупке современного кольцераскатного оборудования с ЧПУ. Под руководством д.т.н. Антонюка Владимира Евгеньевича выполнены разработки по выбору стратегии кольцераскатки применительно к номенклатуре колец белорусских предприятий. Стратегия кольцераскатки заключается в получении готового кольца с одного нагрева, для чего

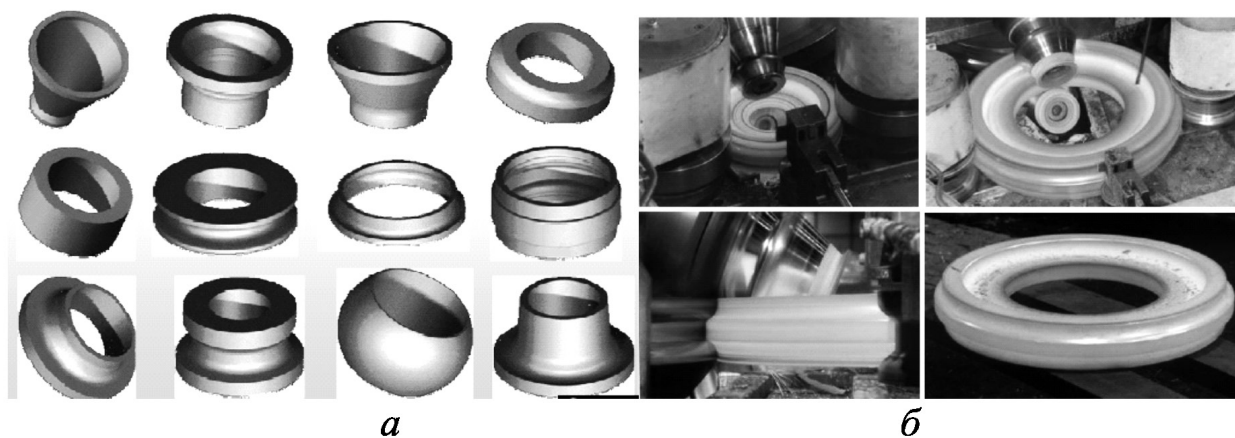


Рис. 15. Возможности кольцераскатки:

а — номенклатура деталей для кольцераскатки; б — раскатка профильных колец

необходимо выбрать оптимальное соотношение геометрических параметров заготовки кольца на всех операциях изготовления, позволяющее использовать минимальные усилия деформирования и соответственно обеспечить оптимальную стоимость оборудования. Результаты этих исследований опубликованы в монографии [13], а также в статьях и докладах конференций, например, [14].

6. Динамическая стабилизация геометрических параметров деталей.

В процессе изготовления большинство деталей подвержено различным видам деформаций, приводящих к изменению их геометрических параметров. Применяются различные технологические правки, которые в большинстве случаев основаны на статическом нагружении детали и поэтому не могут обеспечить сохранение стабильной геометрической формы на протяжении длительного времени.

Для достижения высокой точности и стабильной геометрической формы для нежестких деталей целесообразно использовать динамическую стабилизацию.

К настоящему времени научно обоснован и экспериментально подтвержден процесс динамической стабилизации при нагружении деталей знакопеременной нагрузкой по определенному закону при целенаправленном управлении шириной петли гистерезиса, определены оптимальные диапазоны основных технологических параметров процессов динамической стабилизации и разработаны схемы нагружения и методики инженерных расчетов напряженного состояния деталей типа дисков, плоских колец и валов применительно к условиям их нагружения при динамической стабилизации.

В 2006–2009 гг. создана принципиально новая конструкция установки с ЧПУ для динамической стабилизации фрикционных дисков с диаметром до 1000 мм, которые используются в карьерных самосвалах БелАЗ. Применение нового решения при изготовлении фрикционных дисков дает возможность обеспечить требуемую величину отклонения от плоскостности не более 0,3 мм, снизить припуски под черновое и чистовое шли-

фование, и главное — обеспечить повышение ресурса и конкурентоспособности белорусских карьерных самосвалов.

Экономический эффект за счет сокращения расхода материала, трудоемкости и энергозатрат в составил 920 млн руб. РБ. По теме, связанной с динамической стабилизацией, защищена докторская (В.Е. Антонюк) и кандидатская (В.В. Рудый) диссертации, опубликован ряд работ, например, [15, 16].

Намечены пути дальнейшего использования динамической стабилизации при изготовлении таких деталей, как коленчатые и торсионные валы, венцы маховиков, бурильные трубы, кольца (табл. 1).

Заключение

В Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси развиваются научные основы поверхностного и объемного упрочнения железуглеродистых и алюминиевых сплавов, получен и опробован в производстве ряд новых результатов по исследованию влияния структурно-фазовых превращений на механические свойства сталей и сплавов, эксплуатационную стойкость деталей машиностроения.

В настоящей статье мы попытались сделать краткий обзор этих результатов, преследуя цель заинтересовать руководство и научно-технических работников белорусских и российских организаций в проведении совместных практически ориентированных работ, по их опытной проверке и внедрению в производство.

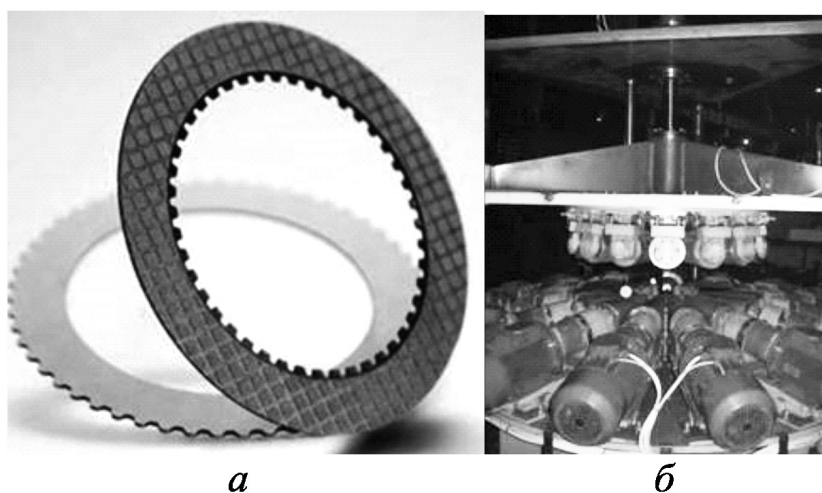


Рис. 16 Динамическая стабилизация фрикционных дисков: а — фрикционный диск, б — установка для динамической стабилизации

Таблица 1

Примеры деталей, для которых возможно применение динамической стабилизации

Детали-представители	Особенности нагружения	Схема нагружения
<p>Диски сцепления</p> 	<p>Нагружение за счет разворота и вращения центральной части диска</p>	
<p>Фрикционные диски</p> 	<p>Нагружение вращением диска между нижним и верхним рядом радиальных роликов</p>	
<p>Венцы маховика, коронные шестерни</p> 	<p>Нагружение вращающимися роликами по отверстию кольца</p>	
<p>Торсионные валы, буровые трубы</p> 	<p>Нагружение изгибом с вращением</p>	
<p>Коленчатые валы</p> 	<p>Нагружение изгибом с вращением вала</p>	

Список использованных источников

1. Сусин, А.А. Изгибная усталость, структура и субмикроструктура конструкционных химико-термически упрочненных сталей / А.А. Сусин, С.П. Руденко // Доклады НАН Беларуси. — 2002. — Т. 46. — № 2. — С. 111–114.
2. Руденко, С.П. Проектирование высокоэффективных технологических процессов химико-термической обработки зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.А. Шипко, А.Л. Валько, О.В. Кузьменков // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011. — № 2. — С. 67–70.
3. Руденко, С.П. Структура цементованных слоев зубчатых колес трансмиссий энергонасыщенных машин / С.П. Руденко, А.Л. Валько, Е.И. Мосунов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 2012. — № 4. — С. 38–42.
4. Витязь, П.А. Влияние наноразмерных частиц углерода на формирование структуры и свойств микродуговых керамических покрытий на сплавах алюминия / П.А. Витязь, А.И. Комаров, В.И. Комарова // Доклады НАН Беларуси. — 2013. — №2. — С. 96–101.
5. Влияние фазового состава наноструктурированного тугоплавкого модификатора на структуру и триботехнические свойства сплава АК12М2МгН / П.А. Витязь [и др.] // Трение и износ. — 2013 (34). — № 5. С. 362–372.
6. Способ получения литого композиционного материала на основе алюминиевого сплава / А.И. Комаров, В.И. Комарова, В.Т. Сенють. — № а20120280; заявл. 28.06.2013.
7. Гурченко, П.С. Современная практика применения индукционной термообработки на Минском автомобильном заводе / П.С. Гурченко, А.И. Михлюк // Индукционный нагрев. — 2007. — №1. — С. 40–44.
8. Гурченко, П.С. Структура и свойства сложнопрофильных шестерен, упрочненных объемно-поверхностной закалкой / П.С. Гурченко, А.В. Толстой, А.А. Шипко // Материалы, технологии, инструменты. — 2006. — Т. 11. — № 2. — С. 91–96.
9. Гурченко, П.С. Термическая обработка при индукционном нагреве и структура стальной дробы, закаленной из расплава / П.С. Гурченко, М.И. Демин, А.И. Комаров // Литье и металлургия. — 2003. — № 4. — С. 78–86.
10. Сандомирский, С.Г. Оценка внутреннего коэффициента размагничивания чугунов по результатам измерения их остаточной намагниченности / С.Г. Сандомирский // Металлы. — 2013. — № 3. — С.88–94.
11. Сандомирский, С.Г. Расчет максимальной магнитной проницаемости ферромагнитного тела по его размагничивающему фактору и параметрам предельной петли гистерезиса / С.Г. Сандомирский // Электротехника. — 2013. — №3. — С. 49–54.
12. Сандомирский, С.Г. Расчет и анализ релаксационных магнитных параметров сталей / С.Г. Сандомирский // Palmarium academic publishing. Saarbrucken, Germany. — 2012. — 100 с.
13. Кольцеракатка в производстве деталей машиностроения / В.Е. Антонюк [и др.]. — Минск: Беларус. навука. — 2013, — 188 с.
14. Особенности использования кольцеракатного комплекса в производстве деталей ОАО «БелАЗ» / П.А. Пархомчик [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения. — Вып. 1. — 2012. — С. 354–357.
15. Антонюк, В.Е. Динамическая стабилизация геометрических параметров деталей знакопеременным нагружением / В.Е. Антонюк. — Минск: Технопринт. — 2004. — 184 с.
16. Рудый, В.В. Работоспособность фрикционных тормозных дисков карьерных самосвалов семейства БелАЗ / В.В. Рудый, В.Е. Антонюк, Э.М. Дечко // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. В, Прикладные науки. — 2010. — № 2. — С. 81–86.