

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РЕМОНТНОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ: АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

К. И. Капырин ¹, А. П. Трясцин ²

^{1,2} Мценский филиал Орловского государственного университета имени И.С. Тургенева,
г. Мценск, Россия,

Автор, ответственный за переписку: Константин Игоревич Капырин kostik72@inbox.ru

Аннотация. В статье проведен анализ перспективности применения методов интенсивной пластической деформации (ИПД) для ремонтного восстановления поверхностного слоя изношенных деталей автомобиля. Предложена классификация типовых деталей по степени применимости методов ИПД для их восстановления. Показано преимущество упрочняющей обкатки с заглаживанием по технологическим и эксплуатационным характеристикам. Сделан вывод об эффективности ИПД для восстановления и упрочнения деталей, что позволяет продлить их ресурс, превосходящий по свойствам исходное состояние нового изделия.

Ключевые слова: интенсивная пластическая деформация, ультрамелкозернистая структура, ремонтное восстановление, автомобильные детали, поверхностное упрочнение, износ, алмазное выглаживание, обкатка с заглаживанием, проковка шариком, ультразвуковое ударное упрочнение.

PERSPECTIVES OF USING INTENSIVE PLASTIC DEFORMATION METHODS IN CAR PARTS REPAIR: AN ANALYTICAL REVIEW

K. I. Kapyrin ¹, A. P. Tryascin ²

^{1,2} Mtsensk branch of the Orel State University named after I.S. Turgenev,
Mtsensk, Russia,

Author responsible for correspondence: Konstantin Igorevich Kapyrin kostik72@inbox.ru

Abstract. The article analyzes the prospects of using severe plastic deformation (SPD) methods for repairing the surface layer of worn-out car parts. It proposes a classification of typical parts based on the degree of applicability of SPD methods for their restoration. The article demonstrates the advantages of hardening rolling with smoothing in terms of technological and operational characteristics. The article concludes that SPD is an effective method for restoring and strengthening parts, which can extend their service life and improve their properties compared to the original state of a new product.

Keywords: severe plastic deformation, ultra-fine grain structure, repair restoration, automotive parts, surface hardening, wear, Diamond Burnishing, deep rolling-burnishing, ball forging, ultrasonic impact hardening.

Введение

Проблема увеличения ресурса машин и механизмов, включая автомобильную технику, является одной из ключевых в современном машиностроении. Значительная часть затрат на содержание автопарка связана с ремонтом и заменой изношенных деталей. Традиционные методы восстановления (наплавка, напыление, гальваника) зачастую имеют ряд недостатков: термические деформации, недостаточная прочность сцепления покрытия с основой, высокая себестоимость и экологические риски. Поэтому проблема повышения

износостойкости деталей автомобилей являются актуальной задачей. В этом контексте методы поверхностного упрочнения, основанные на принципах интенсивной пластической деформации (ИПД), представляют собой перспективную альтернативу. В отличие от объемной ИПД, используемой для получения объемных заготовок с УМЗ-структурой, для ремонтного восстановления необходимо применять локальные методы ИПД-обработки, которые позволяют модифицировать свойства именно поверхностного слоя детали, находящегося в зоне максимальных нагрузок и износа.

Цель работы: провести анализ российского и зарубежного опыта применения методов ИПД и на его основе оценить перспективы их использования для ремонтного восстановления автомобильных деталей с классификацией по применимости метода.

Методы поверхностной ИПД

Интенсивная пластическая деформация – это процесс, в результате которого в материале создаются сверхвысокие степени деформации сдвига, приводящие к фрагментации исходной зеренной структуры до субмикронного или нанометрового уровня. Формирование ультрамелкозернистой структуры согласно классическому соотношению Холла-Петча приводит к резкому повышению предела текучести, твердости и усталостной прочности. Основным направлением применения ИПД является получение материалов с ультрамелкозернистой структурой (УМЗ) с возможностью получения межзёренных границ с большими углами разориентации (до 70...80%) [1]. Структура межзёренных границ оказывает большое влияние на механические свойства [2].

Для целей ремонтного восстановления наиболее пригодны следующие методы поверхностного ИПД:

1. Проковка шариком (Ball Burnishing / Peening) и дробеударное упрочнение: механическое воздействие шариками или дробью на поверхность, создающее остаточные напряжения сжатия и измельчающее структуру поверхностного слоя.

2. Алмазное выравнивание (Diamond Burnishing): пластическое деформирование поверхности твердым (алмазным) индентором с высокой степенью полировки, что одновременно упрочняет и снижает шероховатость поверхности.

3. Ультразвуковое ударное упрочнение (УЗУ) и обработка поверхностным пластическим деформированием (ОППД): технологии, совмещающие вибрационное воздействие с пластическим деформированием, высокоэффективные для обработки сварных швов и сложноконтурных поверхностей.

4. Ротационная ковка (Rotary Forging) и обкатка роликом с заглаживанием (deep rolling-burnishing): методы, при которых деформирующий инструмент (ролик) прокатывается по поверхности с усилием, создавая пластическую деформацию.

Общим для всех методов при восстановлении деталей автомобилей является отсутствие нагрева, что исключает коробление и изменение фазового состава материала.

Современное состояние вопроса

Современные исследования в области ИПД активно развиваются в направлении как фундаментального понимания процессов формирования УМЗ-слоев, так и их промышленного применения. Начало полномасштабных исследований вполне обоснованно связывают с именем Р.З. Валиева [3]. В его работах была показана возможность получения наноструктурных материалов объемной ИПД, однако первые публикации в данной области были сделаны ранее в работах П. Бриджмена, [4] О. Холла [5], Н. Пётча [7] и В. Сегала [7]. Со временем в данном направлении исследований в отечественных и других ведущих научных изданиях мира опубликовано такое огромное количество статей и монографий, что это вылилось в образование нового направления в материаловедении.

Применительно к поверхностным методам, исследования в Германии (например, TU Dortmund), Японии и Китае демонстрируют эффективность алмазного выравнивания и ультразвуковой обработки для повышения усталостной прочности алюминиевых

сплавов, титана и сталей. Например, подтверждено увеличение предела выносливости деталей подвески на 30-50% после обработки проковкой шариком [8]. Разрабатываются роботизированные комплексы для упрочнения сложнопрофильных деталей авиационной и автомобильной промышленности.

Российские научные школы (ЮУрГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ТПУ, ОмГТУ) имеют богатейший опыт в области ОППД. Еще в советский период были разработаны и внедрены в промышленность технологии упрочнения деталей цилиндропоршневой группы, валов, осей и шестерен. Современные российские исследования фокусируются на оптимизации режимов обработки, моделировании процессов деформации и комбинировании ИПД с другими методами. Публикации подтверждают высокую эффективность методов на основе ИПД для восстановления посадочных поверхностей под подшипники, шеек коленчатых валов, кулачков распределительных валов. Однако, коммерциализация разработок и их внедрение в широкую ремонтную практику, особенно в сфере автосервиса, отстают от зарубежных аналогов.

Классификация автомобильных деталей по применимости методов ИПД для восстановления

Автомобильные детали можно классифицировать на три группы по степени применимости и перспективности восстановления методами ИПД.

Группа 1. Высокая применимость (наиболее перспективные детали).

К данному типу относятся детали, у которых основной вид износа потеря размера и геометрии при ограниченной глубине дефектного слоя (до 0,5-1,0 мм). Как правило, это детали из конструкционных сталей, чугунов и сплавов цветных металлов.

Примеры:

- валы (шейки коленчатых и распределительных валов, оси ступиц, хвостовики карданных валов);
- отверстия (посадочные места под подшипники качения в корпусных деталях и втулки подшипников скольжения);
- детали подвески (поворотные кулаки, шаровые опоры (восстановление сферы)).

Технология восстановления предполагает:

- алмазное выглаживание [9];
- ультразвуковое ударное упрочнение [10] с применением специального инструмента для обработки отверстий;
- обкатку роликом с заглаживанием.

Восстановление происходит за счет пластического вытеснения материала и уплотнения поверхности.

Группа 2. Условная применимость (требуется дополнительные исследования и применение комбинированных технологий).

К данному типу относятся детали с комбинированным износом (абразивный, усталостный), с глубокими дефектами (более 1 мм), или изготовленные из труднодеформируемых сплавов.

Примеры:

- шестерни и зубчатые венцы (восстановление профиля зуба методом ИПД проблематично из-за сложной геометрии);
- кулачки распределительных валов (требуется высокоточная обработка профиля после упрочнения);
- детали из алюминиевых сплавов (поршни, головки блока цилиндров) имеют ограниченную пластичность, склонны к трещинообразованию.

Технология восстановления деталей этой группы предполагает возможное применение ИПД как финишной операции после традиционного ремонта (наплавки,

напыления) для упрочнения и уплотнения нанесенного слоя. Либо использование специализированного деформирующего инструмента, повторяющего профиль детали.

Группа 3. Низкая применимость (неперспективные детали)

К данному типу относятся детали, работающие в условиях высоких температур (выше 0,4-0,5 от температуры плавления), где происходит рекристаллизация и разупрочнение УМЗ-структуры; тонкостенные детали, склонные к короблению и детали, вышедшие из строя по причине образования внутренних усталостных трещин (не на поверхности).

Конкретные примеры:

- лопатки турбин турбонагнетателей;
- корпуса каталитических нейтрализаторов;
- радиаторы, тонкостенные корпуса;
- детали с объемными усталостными разрушениями (например, шатуны).

Применение обкатки с заглаживанием для упрочнения и восстановления валов и отверстий

Этот метод входит в группу технологий под общим названием «валковая штамповка» [11, 12, 13]. Сущность метода и технологические особенности заключаются в совмещении двух процессов: осевого сжатия и обкатки боковой поверхности деформирующими роликами. Схема осуществления представлена на рисунке 1, а.

Обрабатываемая деталь (например, вал или втулка) закрепляется в патроне станка на оправке и совершает вращательное движение. Конструкция оправки должна обеспечивать осевое сжатие с нагрузкой, близкой к напряжению пластического течения материала детали. Для обработки отверстий используется инструмент в виде оправки с роликами, которая вставляется в отверстие и расклинивается, после чего-либо оправка проворачивается, либо деталь вращается вокруг нее. При вращении детали и подаче оправки с одновременным осевым сжатием ролики обкатывают поверхность, создавая высокое удельное давление, что приводит к пластической деформации поверхностного слоя. В результате такого нагружения создается значительное гидростатическое сжатие в деформируемом локализованном объеме и высокий градиент напряжений, уплотнение микронеровностей, устранение поверхностных дефектов, а главное – формирование наклепанного слоя с ультрамелкозернистой структурой и значительными остаточными напряжениями сжатия, как на поверхности, так и внутри детали. Параметры этого слоя зависят от количества проходов и величины осевого сжатия (рисунок 1, б [14]).

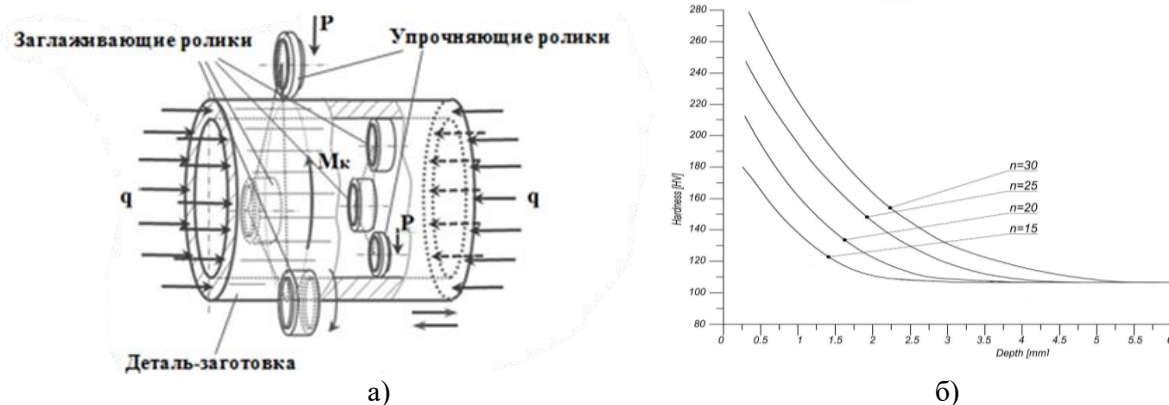


Рисунок 1 – Схема обкатки с заглаживанием (а) [11] и распределение микротвёрдости по глубине упрочнённого слоя Бр/ О5-Ц5С5 в зависимости от числа проходов (б), [14]

Figure 1 – Deep rolling-burnishing scheme (а) [11] and distribution of microhardness along the depth of the hardened layer of bronze Sn5Zn5Pb5 depending on the quantity of passes (б), [14]

Преимущества метода при восстановлении автомобильных деталей:

- высокая производительность (скорость обработки значительно выше, чем при алмазном шлифовании или проковки шариком);
- глубокая пластическая деформация (метод позволяет создавать упрочненный слой глубиной до 2-3 мм и более, что превосходит возможности многих других методов ИПД, что критически важно для восстановления деталей с существенным износом);
- исправление геометрии (эффективно исправляет макроотклонения формы – огранку, бочкообразность, конусность и т.п. до 0,2-0,3 мм на диаметр, что является уникальным свойством, позволяющим не только упрочнить, но и вернуть правильную геометрию валу или отверстию);
- высокое качество поверхности (одновременно с упрочнением достигается низкая шероховатость до Ra0,1-0,4 мкм, что сопоставима с шлифованием или полированием;
- универсальность (подходит для обработки как наружных (валы), так и внутренних (отверстия) поверхностей значительной длины).

Области применения в автомобильном ремонте. Метод подходит для восстановительного ремонта следующих деталей и поверхностей:

- восстановление коленчатых валов (раскатка галтелей шатунных и коренных шеек для повышения усталостной прочности и восстановления посадочных размеров);
- восстановление распределительных валов (упрочнение и выравнивание опорных шеек);
- оси ступиц, полуоси, карданные валы (восстановление посадочных поверхностей под подшипники и сальники);
- цилиндры и гильзы блока двигателя (упрочнение внутренней поверхности и создания износостойкого сетчатого микрорельефа, удерживающего масло);
- отверстия в корпусах (подшипников) и обработки втулок (восстановление размера и геометрии после износа).

Сравнительный анализ процесса упрочняющей обкатки с заглаживанием с другими методами ИПД, рассмотренными в статье, представлен в таблице 1. Анализ показывает следующее.

1) Упрочняющая обкатка с заглаживанием является лидером по сочетанию глубины упрочнения, производительности и способности исправлять макрогеометрию. Это делает ее незаменимой для ответственных деталей со значительным износом, где требуется не просто упрочнение, но и восстановление размера и формы (например, коленчатые валы).

2) Алмазное шлифование превосходит по достижению минимальной шероховатости и идеально для финишной обработки и упрочнения деталей, где важна точная геометрия и низкое трение (посадочные поверхности валов).

3) Ультразвуковое ударное упрочнение не имеет аналогов для обработки невращающихся, сложнопрофильных деталей и зон концентраторов напряжений (сварные швы в элементах рамы, галтели и др.).

4) Дробеударная обработка остается наиболее эффективной для поверхностного упрочнения деталей сложной формы и создания остаточных напряжений сжатия в крупногабаритных конструкциях (например, элементы подвески).

Таким образом, упрочняющая обкатка с заглаживанием занимает свою нишу в арсенале методов ИПД, будучи оптимальным выбором для высокопроизводительного восстановления и упрочнения тел вращения в условиях как специализированных ремонтных заводов, так и крупных автосервисов.

Оборудование и инструмент для реализации методов ИПД

Успешное внедрение технологий ИПД в процесс ремонтного восстановления напрямую зависит от наличия доступного и эффективного оборудования. Условно его можно разделить на несколько категорий: универсальные станки с дооснащением и специализированные установки и ручной инструмент для внестаночного применения.

Таблица 1 – Сравнительный анализ методов ИПД

Table 1 – Comparative analysis of SPD-methods

Параметр	Упрочняющая обкатка с заглаживанием	Алмазное выглаживание	Ультразвуковое ударное упрочнение	Дробеударная обработка (проковка шариком)
Глубина упрочненного слоя	Высокая (1-3 мм и более)	Низкая (0,1-0,5 мм)	Средняя (0,5-1,5 мм)	Низкая (0,1-0,8 мм)
Величина упрочнения				
Производительность	Очень высокая (непрерывный процесс)	Высокая (зависит от подачи)	Низкая / Средняя (точечное воздействие)	Средняя (зависит от площади)
Глубина упрочненного слоя	Высокая (1-3 мм и более)	Низкая (0,1-0,5 мм)	Средняя (0,5-1,5 мм)	Низкая (0,1-0,8 мм)
Производительность	Очень высокая (непрерывный процесс)	Высокая (зависит от подачи)	Низкая / Средняя (точечное воздействие)	Средняя (зависит от площади)
Возможность исправления геометрии	Да, высокая (исправление формы)	Ограниченная (сглаживание микронеровностей)	Нет	Нет
Качество поверхности (шероховатость)	Очень высокое (Ra 0,1-0,4)	Очень высокое (Ra 0,05-0,2)	Среднее (зависит от индентора)	Низкое (поверхность становится матовой)
Универсальность (наружные/внутренние поверхности)	Высокая (и валы, и отверстия)	Высокая (и валы, и отверстия)	Высокая (сложные поверхности)	Высокая (любые поверхности)
Сложность оборудования	Высокая (специальные станки, оправки или головки)	Низкая / Средняя (привод для станка ЧПУ)	Средняя (источник УЗ, манипулятор)	Низкая (дробометная камера или пистолет)
Типичные детали для авторемонта	Коленвалы, распредвалы, карданные валы, гильзы цилиндров.	Шейки валов, посадочные места, точные отверстия.	Зоны концентрации напряжений (галтели, сварные швы).	Листовые детали кузова, рессоры, пружины.

Универсальное станочное оборудование с ЧПУ обладает гибкими возможностями дооснащения следующими видами инструментальной оснастки [15]:

- головки для алмазного выравнивания и обработки шариками;
- оправки для обкатки роликом с заглаживанием.

Представляют собой гидравлические, пневматические, механические и электромеханические головки и оправки, устанавливаемые в резцедержатель станка. Обеспечивают точное и стабильное воздействие деформирующего элемента (алмазного наконечника, ролика или шарика) на обрабатываемую поверхность.

Производителями такого оборудования являются:

- Sensor-tool (Россия). Специализируется на производстве компактных алмазных выравнивателей, легко интегрируемых в любой станок с ЧПУ;
- Heck Industries (США). Производит серию приводов «Diamond Force» для выравнивания и шариковой проковки, известных своей надежностью;

Аналогичные системы разрабатываются в научно-технических центрах при вузах (например, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОмГТУ, ОГУ им. И.С. Тургенева), однако их серийное производство носит штучный характер для проведения исследований.

Специализированное и роботизированное оборудование предназначено для крупных ремонтных заводов или конвейерного восстановления целесообразно применение специализированных станков для ультразвукового ударного упрочнения. Эти установки генерируют высокочастотные колебания, передаваемые на инструмент (иглу). Часто выполняются в виде портативных устройств или стационарных комплексов с ЧПУ.

Производителями такого оборудования являются:

- SONATS (Франция) выпускает автоматизированные роботизированные комплексы ультразвуковой ударной обработки (UIT/USP) для аэрокосмической и энергетической отрасли. Предлагается также и ручной инструмент.
- УЗТО (Ультразвуковые технологии и оборудование, Россия) предлагает оборудование для ультразвуковой обработки, включая установки для упрочнения сварных швов и поверхностей.

Роботизированные комплексы представляют собой робот-манипулятор по сложной траектории обрабатывающий деталь деформирующим инструментом. Это идеально подходит для крупногабаритных и сложнопрофильных деталей (например, элементов рам или кузовов).

Ключевыми производителями здесь являются такие бренды, как KUKA (Германия) или FANUC (Япония), оснащая их специализированными головками для ИПД.

Ручной инструмент для внестаночного применения предназначается для ремонта без демонтажа (например, обработки шеек коленвала непосредственно в блоке двигателя). К такому инструменту относятся:

- ручные гидравлические или механические оправки для алмазного выравнивания (для обработки отверстий и валов с фиксацией на детали или станине);
- ручные пневмомолотки для ударного упрочнения (аналогичны инструменту для УЗУ, но с иным принципом генерации ударов), часто используются для обработки сварных швов и зон концентраторов напряжений.

Ручной инструмент такого типа предлагают компании Desoutter (Великобритания), Atlas Copco (Швеция). Специализированный инструмент для ИПД часто создается малыми предприятиями, ориентированными на конкретные нишевые задачи.

Анализ рынка и тенденции:

1) Зарубежный рынок характеризуется высокой степенью автоматизации, наличием серийных производителей специализированного оборудования и активным внедрением роботизированных комплексов.

2) Российский рынок испытывает дефицит в серийном отечественном оборудовании для ИПД. Преобладают штучные решения от научных институтов и мелкосерийные производства. Это создает нишу для импортозамещения и развития отечественного станкостроения в данной области.

Общая тенденция – это движение к созданию гибридных обрабатывающих центров, совмещающих традиционные методы (точение, фрезерование) и операции поверхностного упрочнения (ИПД) в одной операции.

Заключение

Проведенный анализ показывает, что технологии, основанные на принципах интенсивной пластической деформации, обладают значительным потенциалом для ремонтного восстановления автомобильных деталей. Наличие на рынке широкого спектра оборудования – от простых приводов для станков с ЧПУ до роботизированных комплексов – позволяет внедрять эти методы, как в малых автосервисах, так и на крупных ремонтных заводах.

Ключевыми преимуществами являются:

1) Повышение эксплуатационных характеристик восстановленной поверхности по сравнению с исходным состоянием.

2) Возможность автоматизации и выполнения операций без демонтажа детали (например, обработка шеек коленвала непосредственно в блоке двигателя).

3) Экологическая безопасность (отсутствие вредных выбросов).

Наибольший экономический эффект может быть достигнут при восстановлении деталей первой группы – валов и отверстий из черных металлов. Для широкого внедрения методов ИПД в авторемонтную отрасль необходима разработка специализированного, доступного по цене оборудования (например, на базе станков с ЧПУ или роботизированных комплексов) и создание соответствующих регламентирующих технологических карт.

Ключевыми барьерами для широкого распространения в России являются недостаточная информированность ремонтного сообщества о преимуществах ИПД и дефицит доступного серийного отечественного оборудования. Преодоление этих барьеров требует как популяризации технологий, так и государственной поддержки разработок в области специализированного станкостроения для методов поверхностного упрочнения методами ИПД.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию режимов обработки для конкретных пар материалов шейка вала-вкладыш (цапфа, подшипник), а также на изучение долговечности восстановленных с помощью ИПД деталей в условиях реальной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Valiev, R. Z. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation: ten years later / R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. G. Langdon, M. J. Zehetbauer, Y. Zhu // JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2016. – Vol. 68, No. 4. – P. 1216–1226.
2. Sauvage, X. Grain boundaries in ultrafine grained materials processed by severe plastic deformation and related phenomena / X. Sauvage, G. Wilde, S. Divinsky, Z. Horita, R. Z. Valiev // Materials Science & Engineering A. – 2012. – Vol. 540. – P. 1–12.
3. Valiev, R. Z. Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure / R. Z. Valiev, N. A. Krasilnikov, N. K. Tsenev // Materials Science and Engineering: A. – 1991. – Vol. 137. – P. 35–40.
4. Bridgman, P. W. Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure / P. W. Bridgman // Physical Review. – 1935. – Vol. 48. – P. 825–847.
5. Hall, E. O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results / E. O. Hall //

Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1951. – Vol. 64, No. 381. – P. 747–753.

6. Petch, N. J. The cleavage strength of polycrystals / N. J. Petch // The Journal of the Iron and Steel Institute. – 1953. – Vol. 174. – P. 25–28.

7. Сегал, В. М. Процессы пластического структурообразования металлов / В. М. Сегал, В. И. Резников, В. И. Копылов. – Минск : Наука и техника, 1994. – 231 с.

8. Папшев, Д. Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками / Д. Д. Папшев. – Москва : Машиностроение, 1968. – 132 с.

9. Бафаев, Д. Х. Алмазное выглаживание поверхностного слоя деталей машин и выбор оптимального режима выглаживания / Д. Х. Бафаев // Молодой ученый. – 2016. – № 5 (109). – С. 16–18.

10. Amanov, A. Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy / A. Amanov, Y.-S. Pyun, S. Sasaki // Tribology International. – 2014. – Vol. 72. – P. 187–197.

11. Капырин, К. И. Валковая штамповка как метод интенсивной пластической деформации / К. И. Капырин, А. А. Катунин, А. П. Трясцин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2024. – Т. 9, № 12. – С. 125–141.

12. Голенков, В. А. Специальные технологические процессы и оборудование обработки давлением / В. А. Голенков, В. Д. Дмитриев, С. Ю. Кухарь, С. П. Радченко, С. С. Яковлев. – Москва : Машиностроение, 2004. – 464 с.

13. Голенков, В. А. Теория и технология валковой штамповки / В. А. Голенков, С. Ю. Радченко, Д. О. Дорохов. – Москва : Издательский дом «Оружие и технологии», 2019. – 323 с.

14. Gryadunov, I. M. Deep Hardening of Inner Cylindrical Surface by Periodic Deep Rolling-Burnishing Process / I. M. Gryadunov, S. Yu. Radchenko, D. O. Dorokhov, P. G. Morrev // Modern Applied Science. – 2015. – Vol. 9, No. 13. – P. 251–258.

15. Головин, С. В. Современное оборудование для поверхностного пластического деформирования / С. В. Головин // СТИН. – 2020. – № 5. – С. 44–48.

REFERENCES

1. Valiev, R. Z. Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation: ten years later / R. Z. Valiev, Y. Estrin, Z. Horita, T. G. Langdone, M. J. Zehetbauer, Y. Zhu // JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2016. – Vol. 68, No. 4. – P. 1216–1226.

2. Sauvage, X. Grain boundaries in ultrafine grained materials processed by severe plastic deformation and related phenomena / X. Sauvage, G. Wilde, S. Divinsky, Z. Horita, R. Z. Valiev // Materials Science & Engineering A. – 2012. – Vol. 540. – P. 1–12.

3. Valiev, R. Z. Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure / R. Z. Valiev, N. A. Krasilnikov, N. K. Tsenev // Materials Science and Engineering: A. – 1991. – Vol. 137. – P. 35–40.

4. Bridgman, P. W. Effects of High Shearing Stress Combined with High Hydrostatic Pressure / P. W. Bridgman // Physical Review. – 1935. – Vol. 48. – P. 825–847.

5. Hall, E. O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results / E. O. Hall // Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1951. – Vol. 64, No. 381. – P. 747–753.

6. Petch, N. J. The cleavage strength of polycrystals / N. J. Petch // The Journal of the Iron and Steel Institute. – 1953. – Vol. 174. – P. 25–28.

7. Segal, V. M. Processes of plastic structure formation of metals / V. M. Segal, V. I. Reznikov, V. I. Kopylov. Minsk : Nauka i tekhnologiya Publ., 1994. 231 p.

8. Papshev, D. D. Hardening of parts by rolling balls / D. D. Papshev. Moscow : Mashinostroenie Publ., 1968. 132 p.

9. Bafaev, D. H. Diamond smoothing of the surface layer of machine parts and the choice of the optimal smoothing mode / D. H. Bafaev // Young scientist. – 2016. – № 5 (109). – Pp. 16–18.

10. Amanov, A. Effects of ultrasonic nanocrystalline surface modification (UNSM) technique on the tribological behavior of sintered Cu-based alloy / A. Amanov, Y.-S. Pyun, S. Sasaki // Tribology International. – 2014. – Vol. 72. – P. 187–197.

11. Kapyrin, K. I. Roller stamping as a method of intensive plastic deformation / K. I. Kapyrin, A. A. Katunin, A. P. Tryashtsin // Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. – 2024. – Vol. 9, No. 12. – pp. 125-141.
12. Golenkov, V. A. Special technological processes and pressure treatment equipment / V. A. Golenkov, V. D. Dmitriev, S. Yu. Kukhar, S. P. Radchenko, S. S. Yakovlev. Moscow : Mashinostroenie Publ., 2004. 464 p.
13. Golenkov, V. A. Theory and technology of roller stamping / V. A. Golenkov, S. Y. Radchenko, D. O. Dorokhov. – Moscow : Publishing house "Weapons and Technologies", 2019. – 323 p.
14. Gryadunov, I. M. Deep Hardening of the Inner Cylindrical Surface by Periodic Deep Rolling-Burning Process / I. M. Gryadunov, S. Yu. Radchenko, D. O. Dorokhov, P. G. Mor-rev // Modern Applied Science. – 2015. – Vol. 9, No. 13. – P. 251-258.
15. Golovin, S. V. Modern equipment for surface plastic deformation / S. V. Golovin // STIN. – 2020. – no.