

ва и информационных технологий на различных отраслевых рынках; организация деятельности консультационных фирм в области качества; способность разрабатывать варианты управленческих решений и обосновывать их выбор на основе критериев эффективности и результативности.

Подготовка профессионалов качества разного уровня от бакалавра до доктора технических наук – это весомый вклад в развитие Российской экономики. Можно упомянуть консалтинг различного уровня, аккредитацию преподавателей кафедры в качестве экспертов-аудиторов в системе ГОСТ Р, повышение квалификации работников промышленности и т.д. Сотрудники и выпускники кафедры активно участвуют в разработке новых методов и инструментов качества, совершенствуют системы менеджмента качества, реализуют на практике методы повышения конкурентоспособности.

Подводя итог, можно предложить один из возможных путей развития науки, производства и образования в области качества – создание инновационных методологий (глобальное качество, оптимальное качество, современное бережливое производство и др.) с использованием современных методов менеджмента качества, информационных технологий и профессиональным кадровым и научным сопровождением.

менное бережливое производство и др.) с использованием современных методов менеджмента качества, информационных технологий и профессиональным кадровым и научным сопровождением.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев, В.А., Одинокоев, С.А., Серов, М.М. Современные методы управления качеством при высокоскоростном затвердевании расплава // *Технология металлов*. 2016. № 9. С. 44 – 48.
2. Васильев, В.А., Александрова, С.В. Управление качеством в современных условиях // *Технология металлов*. 2014. № 9. С. 34 – 43.

REFERENCES

1. Vasiliev, V.A., Odinokov, S.A., Serov, M.M. Modern methods of quality control at high-speed melt solidification // *Metal Technology*. 2016. No.9. pp. 44-48.
2. Vasiliev, V.A., Alexandrova, S.V. Quality control under modern conditions // *Metal Technology*. 2014. No.9. pp. 34-43.

Рецензент д.т.н. В.А. Полетаев

УДК 621.9

DOI: 10.12737/article_5aacd858c344d8.93651834

О.Н. Федонин, д.т.н., А.В. Киричек, д.т.н., Д.И. Петрешин, д.т.н.
(Брянский государственный технический университет, 241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7)
E-mail: avk.57@yandex.ru

Технологическое повышение эксплуатационных свойств деталей машин

Рассмотрено влияние технологии изготовления на формирование параметров качества поверхностного слоя и обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. Отмечено влияние на эксплуатационные свойства не только режимов, но и технологического способа обработки, даже при обеспечении аналогичных параметров качества поверхностного слоя. Оценено влияние на работу тяжело нагруженных изделий глубины поверхностного упрочнения и строения несущего слоя. Рекомендована многоуровневая организация поверхностных слоев и подслоев, формирование гетерогенных структур, наноструктурирование тонкого поверхностного слоя. Показаны преимущества поверхностного деформационного упрочнения, в том числе с применением волны деформации и в сочетании с последующей химико-термической обработкой материала. Выявлены перспективы применения волнового деформационного упрочнения в аддитивных технологиях прямого послойного синтеза деталей наукоемких изделий.

Ключевые слова: технология; поверхностный слой; эксплуатационные свойства; материал; послойный синтез; упрочнение; гетерогенная структура; пластическое деформирование; волна деформации.

O.N. Fedonin, D. Eng., A.V. Kirichek, D. Eng., D.I. Petreshin, D. Eng.
(Bryansk State Technical University, 7, 50 Years of October Avenue, Bryansk, 241035)

Technological increase of machinery operation properties

Manufacturing technology impact upon quality parameters of a surface layer and ensuring machinery operation properties is considered. An impact upon operation properties not only of modes, but also a technological method of machining, even at ensuring similar parameters of the surface layer quality is emphasized. The impact of a surface strengthening depth and a structure of a supporting layer upon hard-loaded product operation is estimated. A multi-layer organization of surface layers and sublayers, the formation of heterogeneous structures, thin surface layer nano-structuring are recommended. There are shown advantages of surface deformation strengthening including the use of a deformation wave in combination with the further chemical-thermal treatment of material. The prospects of wave deformation strengthening use in additive technologies of the direct layer-by-layer synthesis of parts in science intensive products are revealed.

Keywords: technology; surface layer; operation properties; material; layer-by-layer synthesis; strengthening; heterogeneous structure; plastic deformation; deformation wave.

Современное машиностроение требует непрерывного повышения технического уровня наукоемких изделий. Научно-технический прогресс повсеместно сопровождается требова-

ниями повышения грузоподъемности, производительности и точности машин, оборудования, предъявляет все более жесткие требования к несущей способности, надежности и долговечности, требует существенного (кратного) повышения эксплуатационных свойств деталей машин. Проблема решается как за счет конструирования изделий и применения материалов новых поколений, так и путем создания новых технологий обработки, которые должны не только эффективно использовать эксплуатационные свойства новых материалов, но и усиливать их.

В процессе изготовления достигается не только требуемая геометрическая точность, но и микрогеометрия, напряженное состояние и микротвердость несущих поверхностей деталей машин. К числу наиболее важных достижений технологической науки, открывающих новые возможности повышения надежности и долговечности машин, относятся разработка учения об определяющем влиянии технологии изготовления деталей на эксплуатационные свойства, о качестве поверхностного слоя и качестве обработки, технологической наследственности. По данным исследований Мичиганского университета на предприятиях США еще в 1982 г. качество поверхностного слоя стало таким же важным показателем процесса обработки деталей, как и производительность для 95 % технологических операций.

Российские ученые внесли большой вклад в развитие науки о технологическом обеспечении качества поверхностного слоя и обеспечении эксплуатационных свойств деталей машин. Установлено влияние качества поверхностного слоя на интенсивность приработки и износостойкость, контактную выносливость и усталостную прочность, живучесть, контактную жесткость. Исследованиями Демкина Н.Б., Евстигнеева М.И., Елизаветина М.А., Костецкого Б.И., Крагельского И.В., Кудрявцева И.В., Маталина А.А., Папшева Д.Д., Подзая А.В., Рудзита Я.А., Рыжова Э.В., Серенсона С.В., Сулимы А.М., Сулова А.Г., Федорова В.П. и многих других ученых убедительно доказана взаимосвязь параметров качества контактирующих и сопряженных поверхностей с их эксплуатационными свойствами.

Для характеристики и оценки качества поверхностного слоя традиционно используются параметры химического состава и структурно-фазового состояния, а также экзотермической эмиссии; широкое применение находит оценка качества поверхностного слоя по параметрам шероховатости, степени упрочнения, напряженного состояния.

Известно, что при аналогичных значениях отдельных параметров качества поверхностного слоя деталей машин, но разных технологических способах их обеспечения, наблюдается серьезный разброс данных по эксплуатационным свойствам.

Например, получено обширное экспериментальное подтверждение существенного увели-

чения предела выносливости поверхностного слоя детали, содержащего остаточные напряжения сжатия, полученные в результате деформационного упрочнения. В то же время, ожидаемое повышение усталостной прочности вследствие создания сжимающих остаточных напряжений в процессе термической обработки очень часто не находит экспериментального подтверждения.

Несущая способность поверхностей, имеющих аналогичную твердость и одинаковые характеристики Ra и $Rmax$, но обработанных различными методами, например, шлифованием и поверхностным пластическим деформированием, разная вследствие различных радиусов вершин микронеровностей r , разного расстояния от линии выступов до средней линии Rp , отличающихся значений относительной опорной длины профиля tp поверхности несущего слоя. При аналогичных величинах Ra , $Rmax$ значения r , tp больше, а Rp меньше при обработке поверхностным пластическим деформированием (ППД).

В связи с этим, в Брянском государственном техническом университете получило развитие научное направление, связанное с прямым одноступенчатым исследованием влияния технологических режимов и способов обработки деталей машин на их эксплуатационные свойства. Проведены обширные исследования влияния технологии изготовления на износостойкость и контактную жесткость деталей машин [1, 2].

Наиболее перспективными направлениями дальнейших исследований закономерностей технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин является более глубокое изучение влияния глубины упрочнения и рационального строения несущего поверхностного слоя, поиск нетрадиционных эффективных комбинированных упрочняющих технологий, расширение технологических возможностей и области применения технологий поверхностного упрочнения.

В процессе эксплуатации деталей всегда наиболее нагружен поверхностный слой, электронная структура которого существенно отличается от электронной структуры объема материала. Это позволяет квалифицировать поверхностный слой твердого тела как особое состояние вещества. При деформации материала структурные изменения в поверхностном и приповерхностном слоях протекают с опережением по сравнению с внутренними объемами. За счет более раннего пластического течения и упрочнения, вследствие повышенной плотности дислокаций, приповерхностный слой становится барьером для выхода дислокаций на поверхность из внутренних слоев металла, что предполагает возможность повышения механических свойств материала модификацией его тонких поверхностных слоев [3].

В подавляющем большинстве случаев поверхностный слой деталей работает в условиях сложного напряженного состояния. При интенсивной эксплуатации наиболее нагруженная

точка чаще всего находится не на поверхности, а на некоторой глубине. В связи с этим, весьма заманчивая перспектива повышения свойств исходного материала невысокого качества за счет нанесения тонких твердых покрытий чаще всего нереализуема. Глубина несущего поверхностного слоя детали, формирующегося при изготовлении и эксплуатации, может составлять от десятых долей микрометра до нескольких миллиметров и даже десятков миллиметров.

Применение высокопрочных материалов для изготовления ответственных деталей обеспечивает снижение массы и повышение технико-экономических показателей машин. Однако рост статической прочности металлов сопровождается резким замедлением роста их предела выносливости, более высокой чувствительностью к концентрации напряжений. Чувствительность металла к поверхностным концентраторам напряжений зависит от условий нагружения.

В условиях периодического контактного воздействия, циклического изгиба или кручения, когда поверхностные слои подвергнуты более высокому действию напряжения, чем нижележащие слои, чувствительность к рискам, поверхностным концентраторам увеличивается по сравнению с условиями однородного распределения напряжений по сечению детали в условиях растяжения–сжатия. Наличие грубых рисок на высоконапряженной переходной поверхности зуба, обработанной фрезерованием и шлифованием, вызывает появление и локализацию пластических деформаций, даже если максимальные местные напряжения ниже предела упругости. Такие пластически деформированные объемы в условиях циклических напряжений развиваются в магистральные трещины, приводящие к разрушению.

Исследования контактной выносливости и контактной прочности деталей машин, в том числе деталей зубчатых передач, 90 % которых заменяются по причине контактного разрушения зубьев, показали, что упрочненные (например, ХТО) рабочие поверхности могут подвергаться поверхностным и глубинным контактным разрушениям [4]. Возникновение тех и других может происходить независимо, так как они обусловлены различными факторами. Наиболее опасны глубинные контактные разрушения: они имеют прогрессирующий характер, приводят к отделению крупных частиц металла, интенсивному изнашиванию зубьев. Переход от поверхностного к глубинному разрушению приводит к резкому снижению долговечности.

Аналогичный процесс имеет место и при эксплуатации деталей с упрочняющими покрытиями. Отмечено, что для поверхностей с упрочняющими покрытиями, работающих в условиях высоких контактных нагрузок, правильное назначение толщины и механических характеристик материала основы и покрытия становится определяющим в обеспечении работоспособности поверхностного слоя. В зависимости от толщины и механических свойств упрочненного слоя (покрытия) возможны следующие

механизмы разрушения: пластическое деформирование (продавливание покрытия), отслаивание, возникновение поверхностных трещин и трещин на границе раздела покрытия и основы, формирование мощных концентраторов напряжений, релаксация которых происходит за счет разрушения несущего слоя. Другой проблемой упрочнения поверхностного слоя является то, что при существенном повышении предела текучести и предела прочности происходит одновременное значительное снижение его пластичности. Особенно сильно это проявляется для высокопрочных материалов, поскольку размер критического дефекта в них составляет 1...30 мкм.

Известные технологии обработки и упрочнения, как правило, не позволяют полностью раскрыть потенциал материала. Анализ технологических возможностей способов поверхностного упрочнения свидетельствует об ограниченности каждого.

Прирост прочностных свойств конструкционных материалов за последние десятилетия был обусловлен в основном разработкой сплавов с новым химическим и фазовым составом, но в последние годы наметились новые пути повышения свойств конструкционных материалов за счет целенаправленного формирования интенсивной пластической деформацией микро- и нанокристаллической структуры, позволяющей наряду с повышением прочности и твердости сохранять высокий уровень вязкости и пластичности [5].

В общем случае упрочнением необходимо обеспечить тонкий твердый слой глубиной 5...100 мкм, лежащий на глубоком и градиентно упрочненном переходном подслое. Для повышения нагрузочной способности желательна многоуровневая организация тонких поверхностных слоев и подслоев, позволяющая обеспечивать несколько уровней самоорганизации материала при разрушении. Несущие поверхностные объемы материала должны быть многослойными, гетерофазными, наноструктурированными, границы фаз – размытыми, зубчатыми или игольчатыми. Желательно наличие широкой диффузионной зоны между основой и твердым тонким поверхностным слоем, образование таких гетерофазных структур, в которых нанокристаллы высокопрочной фазы окружены нанопрослойками сдвигонеустойчивой фазы – стабилизатора.

Направленному поиску прогрессивных технологий создания градиентного гетерогенного материала, армированного областями высокопрочной фазы, которые окружены пластичными и вязкими прослойками, препятствует сложившийся стереотип необходимости равномерного упрочнения поверхностного слоя, что объясняется неоднозначным влиянием пластичных прослоек на прочностные свойства гетерогенного материала. Свойства гетерогенных материалов в значительной степени определяются не только свойствами каждого компонента, но и их соотношением в композиции, формой,

пространственным расположением, ориентацией частиц более прочной фазы в пластичной матрице.

Для создания композиционного упрочненного слоя, отличающегося наличием регулярных градиентных областей с модифицированным структурно-фазовым состоянием, наиболее перспективными являются технологии, относящиеся к пластическому деформированию.

Исследованиями качества обрабатываемой поверхности и технологии обработки пластическим деформированием занимались А.Ю. Албагачиев, П.Г. Алексеев, А.И. Андрианов, Б.М. Аскинази, А.П. Бабичев, М.А. Балтер, В.А. Белов, А.Г. Бойцов, В.М. Браславский, М.С. Дрозд, М.М. Жасимов, С.А. Зайдес, Е.Г. Коновалов, И.В. Кудрявцев, Н.Д. Кузнецов, А.А. Маталин, А.А. Михайлов, Л.Г. Одинцов, Н.В. Олейник, Д.Д. Папшев, Е.В. Перепичка, В.В. Петросов, В.П. Пономарев, Ю.Г. Проскураков, В.И. Серебряков, В.А. Сидоренко, В.М. Смелянский, А.Г. Суслов, В.М. Торбило, Л.А. Хворостухин, В.И. Цейтлин, П.А. Чепя, Л.М. Школьник, Ю.Г. Шнейдер, Д.Л. Юдин, А.И. Якушев, и др.

Исследования с помощью оптического и электронного микроскопов, рентгеноструктурного и резистометрического анализов, методов внутреннего трения показали, что пластическая деформация способствует повышению плотности и активности взаимодействия дислокаций; интенсификации диффузии атомов примесей; развитию различных стадий деформационного старения; распаду пересыщенного твердого раствора; снижению локальных микронапряжений; уменьшению количества остаточного аустенита [6].

При обработке ППД отсутствуют термические дефекты и шаржирование обрабатываемой поверхности абразивом; обеспечивается минимальная шероховатость поверхности с благоприятной формой микронеровностей и большой долей опорной площади; создаются сжимающие остаточные напряжения; плавно и стабильно повышается микротвердость поверхностного слоя. Комплекс механических свойств после ППД лучше у стали с мартенситной, чем у стали с сорбитной и трооститной структурой. Наибольший эффект от упрочнения ППД достигается для циклически нагружаемых деталей с конструктивными (галтели, выточки, резьбы, зубья, шлицы) или эксплуатационными (царапины, надрезы) концентраторами напряжений.

Предварительная холодная пластическая деформация перед ХТО интенсифицирует диффузионные процессы и позволяет достигнуть более высоких значений концентрации углерода в диффузионной зоне. Проведение ППД перед цементацией позволяет получать структуру с более мелкими карбидными частицами, что повышает эксплуатационные свойства поверхностного слоя. Установлено [7], что поверхностный слой после ППД и ХТО имеет в 2 – 3 раза меньшее содержание остаточного аустенита и более равномерную структуру скрытоигольча-

того мартенсита.

В результате упрочнения ППД становится возможным применение высокопрочных сталей с мартенситной структурой для деталей с высокой концентрацией напряжений, подвергающихся значительным циклическим перегрузкам. По эффективности повышения усталостной прочности концентраторов напряжений ППД превосходит другие виды деформационного и химико-термического упрочнения. При оптимальных режимах ППД долговечность деталей при перегрузках повышается в десятки раз, а предел выносливости в 1,5 – 3 раза.

Из мировой научной и технической практики известно, что получение значительных деформаций, за счет создания больших давлений в области контакта при сравнительно небольшой затраченной мощности, наиболее эффективно ударным нагружением материала. Однако при одной и той же энергии удара в зависимости от способа подвода энергии и применяемой ударной системы достигаются разные результаты. Эффективность динамического нагружения определяется формой импульса, поступающего в очаг деформации.

Проведенные исследования показали, что в ударных системах с промежуточным звеном генерируются плоские акустические волны, которые характеризуются законом изменения сил (амплитуды волны деформации) во времени, максимальным значением сил, временем и периодичностью действия сил (длительность и скажность импульса) и энергией волны деформации.

Волна деформации состоит из потока пролонгированных ударных импульсов (период волны), имеющих головную и хвостовую части. Параметры головной части импульса в основном зависят от геометрических размеров и свойств материала бойка и волновода, скорости удара бойка по волноводу. Хвостовая часть импульса формируется за счет энергии отраженных волн деформации и зависит от упругопластических свойств нагружаемого материала, приведенной кривизны инструмента и обрабатываемой поверхности. Использование хвостовой части позволяет пролонгировать воздействие ударного импульса на материал, интенсифицировать упругопластическую деформацию и в 3–5 раз увеличить количество передаваемой в очаг деформации энергии, по сравнению с ударными системами без промежуточного звена [8, 9].

Статическое поджатие волновода с инструментом к нагружаемой поверхности создает условия для предотвращения преждевременного разрыва контакта в процессе удара, обеспечивая рекуперацию отраженных волн деформации. Большое количество управляемых технологических факторов обеспечивает высокую управляемость и гибкость процесса, широкие возможности варьирования параметрами качества поверхностного слоя.

Для каждого материала существует оптимальная длительность импульса, при достиже-

нии которой обеспечиваются максимальные степень и градиент наклепа. Увеличение количества управляемых технологических факторов обеспечивает высокую гибкость процесса, широкие возможности варьирования параметрами качества упрочненного поверхностного слоя.

Способ позволяет получать на полноразмерных изделиях гетерогенно упрочненную структуру с заданными свойствами, как по глубине, так и вдоль упрочненной поверхности, структурировать на нано уровне наиболее упрочненные области. Электронный микроскоп фиксирует структурные составляющие, размер которых варьируется в диапазоне 30...90 нм [10]. По сравнению со сплошным упрочнением материала, потеря ударной вязкости материала с гетерогенной структурой – менее 5 %, что в 7 раз меньше по сравнению со сплошным упрочнением материала.

Установлена возможность получения глубокого упрочненного слоя 10...15 мм, что в 2 – 3 раза больше, по сравнению с известными способами деформационного упрочнения. Упрочняется не только контактная, но и опорная поверхности в результате действия отраженных волн деформации. На абсолютные значения параметров упрочненного слоя влияют форма и размеры упрочняемого изделия вследствие изменения волновых состояний материала в теле образца, формирования областей концентрации сжимающих и растягивающих напряжений. Следует учитывать и влияние технологической наследственности, сформированной на предшествующих технологических операциях, анизотропии свойств, вследствие направленной деформации зерен. Уникальна возможность снижения, вплоть до ликвидации, анизотропии за счет дробления зерен.

Важной особенностью способа упрочнения ударными волнами деформации является возможность регулирования передаваемой энергии заданному участку поверхности упрочняемого металла, причем размеры такого участка могут варьироваться от 1...2 до 50 мм, что позволяет в широком диапазоне регулировать требуемую глубину, степень и равномерность упрочнения, возможность создания градиентного гетерогенно упрочненного естественно армированного материала [11, 12].

Эффективность волнового деформационного упрочнения, в том числе в сочетании с ХТО (цементацией), определялась экспериментально. В результате гетерогенного упрочнения материала волной деформации, в т.ч. комбинированного, отмечено кратное (в 7–10 раз) повышение долговечности при работе в условиях контактно-усталостного изнашивания [13, 14].

Перспективно применение волнового деформационного упрочнения в процессах прямого послойного синтеза изделий в аддитивных технологиях [15].

Аддитивные технологии уже приобрели статус стратегически важных, приоритетных технологий машиностроения. Существующие на сегодня передовые установки для реализации

аддитивных технологий содержат в своем составе два модуля. Для наращивания используется аддитивный модуль, для выполнения коррекции формы механической обработкой резанием – субтрактивный. Такое сочетание является оптимальным для решения задач формообразования.

Точное получение формы – это важнейшая, но далеко не единственная задача, которая решается при производстве деталей. Важнейшей задачей современных аддитивных технологий является обеспечение качественной структуры материала и высоких эксплуатационных свойств получаемой детали при многократном увеличении производительности.

Высокотемпературное воздействие, которым сопровождается любой из известных аддитивных процессов, негативно сказывается на материале заготовки. Особенности технологии является обеспечение высокого качества структуры при весьма низкой производительности и высокой себестоимости процесса. С ростом производительности резко увеличивается количество дефектов структуры, растет пористость, снижаются механические и эксплуатационные свойства.

Процесс аддитивно-субтрактивной обработки, совмещенный с волновым деформационным упрочнением, позволяет структурировать, уплотнить, упрочнить материал выращенного слоя, сформировать вместо растягивающих остаточных напряжений термической природы сжимающие.

Проведены сравнительные исследования по структуре железоуглеродистого материала, полученного аддитивно-субтрактивной технологией и аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологией. Установлено, что в упрочненном материале, в отличие от неупрочненного, практически отсутствуют скрытые полости. Средний размер зерна образца, выращенного по технологии с упрочнением, снижается более чем в 2 раза, а твердость увеличивается в 1,5–2 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. – М.: Машиностроение, 2000.
2. Рыжов, Э.В., Суслов, А.Г., Федоров, В.П. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2006. – 186 с.
3. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2006. – 520 с.
4. Генкин, М.Д., Рыжов, М.А., Рыжов, Н.М. Повышение надежности тяжелонагруженных зубчатых передач. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
5. Валиев, Р.З., Александров, И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура, свойства. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
6. Васильева, А.Г. Деформационное упрочнение закаленных конструкционных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 231 с.

7. Папшев, Д.Д., Пронин, А.М., Кубышкин, А.Б. Эффективность упрочнения цементованных деталей машин // Вестник машиностроения. – 1990. – № 8. – С. 61–64.

8. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Лазуткин, А.Г. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2004. – 288 с.

9. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л. Создание поверхностного слоя с высокими эксплуатационными свойствами волновым деформационным упрочнением // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2014. – № 4 (205). – С. 3–7.

10. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Кузьменко, А.П. Использование ударных волн деформации для наноструктурирования металлических материалов // Научноёмкие технологии в машиностроении. – 2015. – № 8 (50). – С. 17–22.

11. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л. Перспективы кратного повышения эксплуатационных свойств естественным армированием металлических материалов при технологическом обеспечении многоуровневой гетерогенной структуры // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 4 (112). – С. 3–10.

12. Kirichek A.V., Solovov D.L. Properties and technology for quasi-composite blanket using natural reinforcement of the metal by strain affected areas // Журнал нано- и электронной физики. 2013. Т. 5. № 4 Part1. С. 04010-1-04010-5.

13. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Баринов, С.В., Силантьев, С.А. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 7(43). – С. 9–15.

14. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Тарасов, Д.Е. Упрочнение железоуглеродистых сплавов комбинированной обработкой волной деформации и цементацией // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. № 12. – С. 36–39.

15. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Жирков, А.А., Федонин, О.Н., Федонина, С.О., Хандожко, А.В. Возможности аддитивно-субтрактивно-упрочняющей технологии // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 4 (52). – С. 151–160.

REFERENCES

1. Suslov, A.G. *Quality of Machinery Surface Layer*. – М.: Mechanical Engineering, 2000.

2. Ryzhov, E.V., Suslov, A.G., Fedorov, V.P. Technological support and operation properties increase of parts and their Joints: Technologist's Library. – М.: *Mechanical Engineering*, 2006. – pp. 186.

3. *Surface Layers and Inner Limits of Partition in Heteroge-*

neous Materials / under the editorship V.E. Panin. – Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2006. – pp. 520.

4. Genkin, M.D., Ryzhov, M.A., Ryzhov, N.M. *Heavily-loaded Gearing Reliability Increase*. – М.: Mechanical Engineering, 1981. – pp. 232.

5. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V. *Bulk Nano-structured Metal Materials: Manufacturing, Structure, Properties*. – М.: PC "Academbook", 2007. – pp. 398.

6. Vasilieva, A.G. *Deformation Hardening of Hardened Structural Steel*. – М.: Mechanical Engineering, 1981. – pp. 231.

7. Papshev, D.D., Pronin, A.M., Kubyshekin, A.B. Strengthening efficiency of carbonized machine parts // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 1990. – No.8. – pp. 61-64.

8. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Lazutkin, A.G. Technology and equipment of static-pulse processing with surface plastic deformation: Technologist's Library. – М.: Mechanical Engineering, 2004. – pp. 288.

9. Kirichek, A.V. Soloviyov, D.L. Formation of surface layer with high operation properties through wave deformation strengthening // *Reference Book. Engineering Journal with Appendix*. – 2014. – No.4 (205). – pp. 3-7.

10. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Kuzmenko, A.P. Deformation shock wave use for meta material nano-structuring // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – No.8 (50). – pp. 17-22.

11. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L. Outlooks in multiple increase of operation properties by metal material natural reinforcement at technological support of multi-level heterogeneous structure // *Hardening Technologies and Coatings*. – 2014. – No.4 (112). – pp. 3-10.

12. Kirichek A.V., Soloviyov D.L. Properties and technology for quasi-composite blanket using natural reinforcement of the metal by strain affected areas // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2013. Vol.5. No.4 Part1 C. 04010-1-04010-5.

13. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Barinov, S.V., Silantiev, S.A. Contact endurance increase in machinery through hardening with static-pulse processing // *Hardening Technologies and Coatings*. – 2008. – No.7 (43). – pp. 9-15.

14. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Tarasov, D.E. Iron-carbon alloy hardening by combined processing of wave deformation and carbonizing // *Hardening Technologies and Coatings*. – 2013. No.12. – pp. 36-39.

15. Kirichek, A.V., Soloviyov, D.L., Zhirkov, A.A. Fedonin, O.N., Fedonina, S.O., Khandozhko, A.V. Potentialities of additive-subtractive hardening technology // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2016. – No.4 (52). – pp. 151-160.

Рецензент д.т.н. А.Г. Суслов

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбова.

Сдано в набор 29.02.2018. Выход в свет 30.04.2018.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+