

УДК 669.017.621.044.2

Р.П. Дидык

**НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

Показана можливість ефективного використання високомодульних джерел енергії, що включає енергію вибуху та потужних ультразвукових випромінювань, в технологічних процесах зварювання, зміцнення, синтезу надтвердих матеріалів, розмірної чистової обробки деталей, що отримали початок та розвиток в Дніпропетровському гірничому інституті ім. Артема нині Національному гірничому університеті.

Показаны возможности эффективного использования высокомодульных источников энергии, включая энергию взрыва и мощных ультразвуковых излучателей, в технологических процессах сварки, упрочнения, синтеза сверхтвердых материалов, размерной чистовой обработки деталей, получивших начало и развитие в Днепропетровском горном институте им. Артема ныне Национальном горном университете.

The possibilities of the effective use of high-modules power sources including energy of explosion and powerful ultrasonic vibrators for manufacturing welding methods, hardening, synthesis of superstrenght materials, and dimensional finishing of components began and development in the Dnepropetrovsk mining institute the name of Artema now the National mining university are shown in the paper.

*А в мыслях все двойной предмет –
Прогресс и память прошлых лет
Н.Огарев*

Достигнут ли предел прочности металлов, ограничены ли возможности создания новых? На первый взгляд сама природа поставила непреодолимый барьер в достижении этой цели. В самом деле, как можно обработать материал, придать ему новые свойства в условиях сверхвысоких давлений, если узлы агрегатов при этом претерпевают собственную деформацию, как можно нагреть материал до сверхвысоких температур, если при температурах выше 4000 °С происходит оплавление нагревательных устройств? Почему мы акцентируем внимание на давлениях и температурах, как необходимых источниках фундаментальных преобразований материалов? Да потому, что в условиях действия сверхвысоких давлений и температур происходят удивительные превращения в обрабатываемых материалах.

Источниками достижения экстремальных физических параметров, позволяющих развитие в земных условиях рекордных комбинаций давлений и температур, являются ядерный и обычный взрывы, лазерные и электронные пучки, мощные электрические разряды в жидкости, магнитные поля высокой напряженности.

В современных условиях в руках ученых–исследователей взрыв превратился в тонкий, чувствительный инструмент в создании принципиально новых материалов и эффективных способах их обработки.

Использование высокомодульных источников в технологических процессах металлообработки следует рассматривать как одно из значительных достижений последних лет в области науки и техники. Особенности обработки, связанные с использованием ударных волн различной интенсивности, позволили создать принципиально новые технологические процессы обработки материалов, расширить границы и возможности существующих технологий.

Развитие методов взрывной обработки материалов выдвинуло ряд важных проблем в механике деформируемого твердого тела, материаловедении и физике взрыва. Для использования и анализа явлений взрыва, оценки поведения материалов в условиях действия высоких градиентов давлений и скоростей нагружения были разработаны аналитические и численные методы определения параметров воздействия, а также современные методы регистрации быстропротекающих процессов. Фундаментальные работы в этой области позволили создать ряд высокоэффективных технологических процессов в обработке материалов.

Так, энергия взрыва эффективно используется в формообразующих операциях обработки металлов давлением, резки, сварки и упрочнения металлов. С помощью взрыва воспроизводятся тончайшие узоры на металле, ускоряются процессы полимеризации, осуществляется синтез алмазов, создаются высокоплотные компакты из порошковых

материалов, стимулируются процессы дефектообразования в сверхтвердых материалах, регулируются величины остаточных напряжений сложных механических конструкций [1].

Сварка взрывом. На первых этапах исследований были установлены поистине уникальные возможности сварки взрывом, позволяющие осуществить практически прочную связь любых металлов и сплавов.

Прогнозы в области материаловедения сходятся на том, что качественное улучшение свойств материалов в ближайшее десятилетие можно достичь не только усовершенствованием производства и обработки известных сплавов, но и созданием композиционных, в частности, слоистых материалов. Помимо высокого уровня прочности, коррозионной стойкости и т.д., слоистые материалы обладают одним очень важным свойством – высоким сопротивлением распространению трещин. Поэтому сварка взрывом приобретает особое значение в создании различных конструкций с высоким ресурсом надежности и долговечности.

Прологом к работам фундаментальных и прикладных исследований в области сварки взрывом, выполненных в Национальном горном университете, как нельзя лучше подходят слова известного поэта Евгения Евтушенко: **«...замечали танкисты не раз на войне, прикипают, расплющившись пули к броне, словно родинки смертью подаренные, неразгаданной сваркой приваренные...»**

Соединение металлов взрывом осуществляется в режиме высокоскоростного соударения взаимодействующих металлов без предварительного нагрева при высоких энергетических показателях источника и условий деформирования. В основе схватывания металлов при сварке взрывом лежит интенсивная пластическая деформация контактных поверхностей, сопровождающаяся образованием устойчивой либо неустойчивой кумулятивной струи, причем этот процесс сопровождается волнообразованием на границе сварки. Деформирование контактных поверхностей и струеобразование, а, следовательно, и свойства зоны соединения для заданной пары металлов при неизменных условиях определяются параметрами: нормальной скоростью соударения, скоростью точки контакта, углом между плакирующим слоем и основанием в процессе накатывания (рис. 1, а, б).

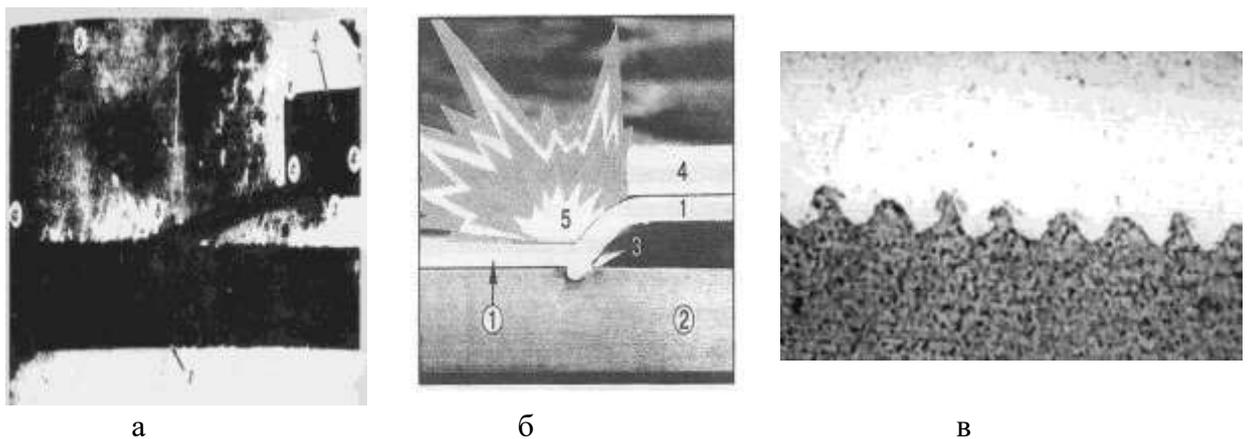


Рис.1. Динамика процесса сварки взрывом: а – импульсная рентгенограмма момента сварки взрывом через 22 мкс после инициирования взрыва; 2 – неподвижная пластина; 3 – метаемая пластина; 4 – недетонированная часть заряда ВВ; 5 – детонатор (официальная фотография института Гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН); б – схематическое изображение профиля образца после «внезапной остановки» процесса сварки взрывом: 1 – метаемая (алюминиевая) и 2 – основная (стальная) пластины; 3 – обратная струя (алюминий); 4 – слой вещества; 5 – изображение взрыва на момент «внезапной остановки» процесса; в – макрофотография волнообразной границы сварки взрывом, как результат высокоскоростного соударения металлических пластин

Особенностью теоретических и экспериментальных работ в области сварки взрывом, которые выполнялись в университете в то время, были фундаментальные исследования и разработка на их основе технологии производства многослойных труб, как основного вида биметаллической продукции. Чрезвычайно малая длительность ударных нагрузок (процесс сварки длится несколько десятков мкс) потребовали разработки новых методов измерений и создания аппаратного обеспечения, которые позволили определить заданные физические параметры в условиях высокоскоростного процесса. Плодотворность идей, приведенных в исследованиях, которые относятся к сварке труб взрывом, заключалась в принципиальной оценке гидродинамической модели для расчета начальных параметров соударения твердых тел, разработке программ численных методов исследований динамики цилиндрических оболочек, выбором приоритетного направления в области конструирования технологического оборудования, критериальной оценке ресурса его работы, а также обосновании типов используемых взрывчатых материалов. На рис. 2 в левой его части приведена гидродинамическая расчетная модель поведения цилиндрической оболочки, подверженной действию взрыва, а в правой части фрагмент сверхскоростной съемки реального взрывного деформирования оболочки. Следует обратить внимание, при сравнительной оценке, удовлетворительную сходимость результатов теории и эксперимента как по контуру стенки оболочки, так и облаку разлетающихся продуктов детонации.

Уровень научно-технических решений и промышленного освоения сварки взрывом позволили создать высокоэффективную технологию изготовления многослойных конструкций в трубном производстве.

На рис. 3 показан графический метод решения системы основных уравнений, представленный в виде номограмм, с помощью которых можно определить необходимую величину заряда при заданной толщине и пластичности материала труб с учетом выбранного зазора.

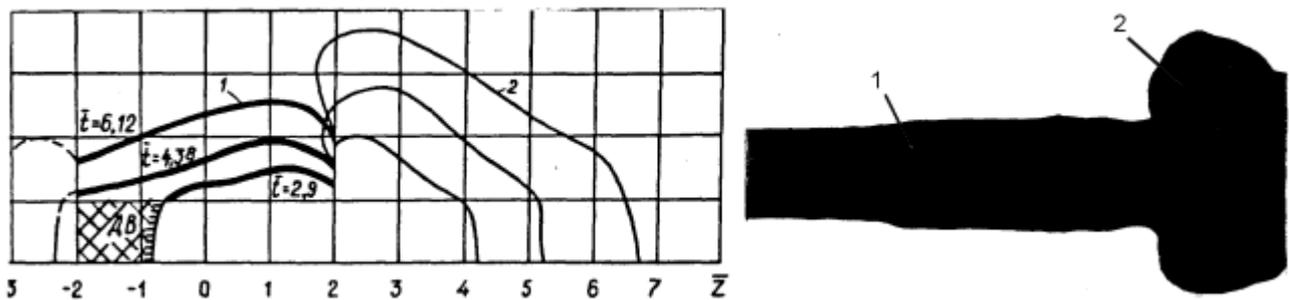


Рис. 2. Гидродинамическая модель поведения цилиндрической оболочки подверженной действию взрыва (левая часть: 1 – контуры оболочки в различные моменты времени, t , мкс; 2 – контуры продуктов детонации) и натурная съемка деформации трубы взрывом (правая часть: 1 – контур оболочки в момент ее деформации; 2 – контур ПД)

Сортамент биметаллических труб, полученных сваркой взрывом, и область их использования приведены в табл 1.

Упрочнение металлов взрывом. Преимущества взрывной деформации по сравнению с обычными методами деформационного упрочнения, выявившиеся в отсутствии или незначительной остаточной деформации, изотропности упрочнения, при высоких показателях прочности, стимулировали глубокий интерес специалистов к металлургическим проблемам и практическим задачам взрывного упрочнения.

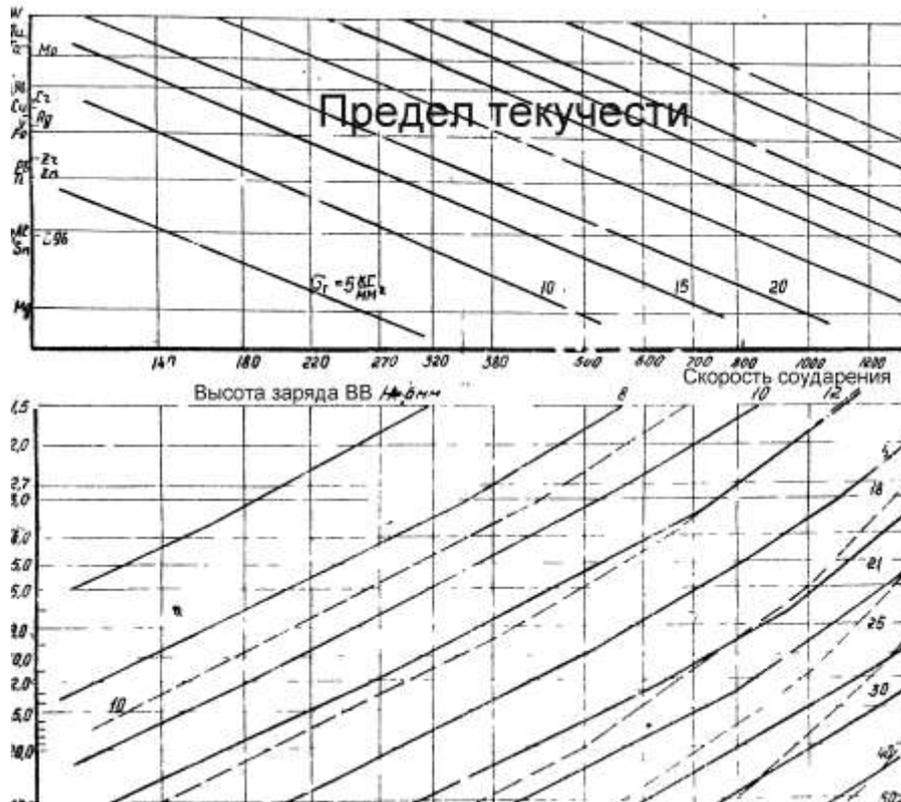


Рис. 3. Номограмма для расчета параметров сварки взрывом

Таблица 1

Сортамент биметаллических труб, полученных сваркой взрывом

№ п/п	Биметаллические трубы	Область применения
1	Ст. 10 + медь	химическая промышленность, морфлот
2	X18H10T + АМГ-6 X18H10T + ВТ5	ракетостроение
3	Медь + ниобий + медь	волоконная оптика
4	X18H10T + цирконий	атомная энергетика
5	АДІ + медь	силовая энергетика
6	Ст. 20 + X18H10T	машиностроение
7	38ХНЗМФА + ЭП131	машиностроение
8	АД+X18H10T	авиация
9	38ХНЗМФА+ВХ-2К	машиностроение

Существенным вкладом в проблему упрочнения взрывом следует рассматривать работы, особенностью которых являлись исследования структурных изменений в сталях, подверженных действию различных по энергоемкости зарядов ВВ. На основании исследований установлено, что структурные изменения, обуславливающие высокую степень упрочнения при значительной пластичности материала, могут быть получены в результате использования комбинированных зарядов ВВ с определенными параметрами.

Различие в эффекте упрочнения металлов при контактном взрыве, как было установлено исследованиями, связано с начальными параметрами на границе раздела “ВВ - металл”, которые определяются, прежде всего, типом ВВ, условиями развития и

взаимодействия детонационной волны с преградой, исходным состоянием и поведением обрабатываемого материала в условиях высокого динамического давления.

Обширные эксперименты по влиянию ударных волн на циклическую прочность различных сталей показали высокую эффективность взрывной обработки. На рис. 4 приведены сравнительные данные различных упрочняющих обработок стали 40ХН на показатели циклической прочности. Показано, что при выбранной технологической схеме взрывного упрочнения, предел выносливости указанной марки стали возрастает на 50–60 %.

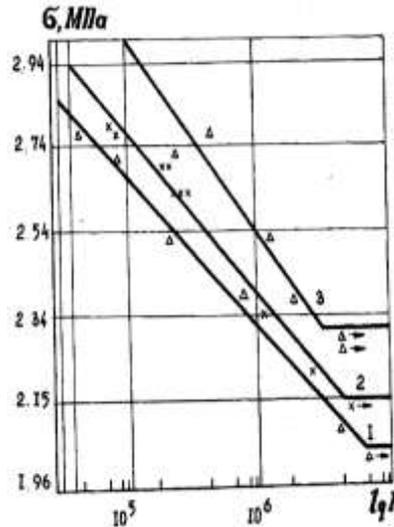


Рис.4. Сравнительная оценка предела выносливости стали 40ХН при различных способах упрочнения: 1 – термическая обработка; 2 – накатка роликами; 3 – взрывное упрочнение

Разработана и использована на практике схема упрочнения металлов двухслойным составом ВВ, слои которого резко отличаются по своим физико-химическим свойствам, и показана высокая эффективность этой схемы по сравнению с ранее применяемыми схемами взрывного упрочнения. Установлены критериальные условия, исключающие микро- и макроразрушения материала при его обработке взрывом. Исследованы детонационные режимы в комбинированных зарядах с цилиндрической и конической симметрией, на основании которых определен диапазон оптимальных углов встречи фронта детонации с поверхностью металла, при котором достигается максимально возможный эффект упрочнения.

Результаты исследований по проблемам упрочнения металлов взрывом послужили основанием для разработки технологии обработки деталей наиболее полно характеризующих тяжелое машиностроение металлургического и горного оборудования (прокатные валки, зубчатые передачи тяговой лебедки шагающего экскаватора ШГ–15/90, зубья ковшей экскаваторов), которые с высокой экономической эффективностью были реализованы на крупнейших предприятиях страны.

На рис. 5 приведена технологическая схема упрочнения взрывом зубьев ковшей экскаватора ЭКГ-4.

Развитием работ по взрывному упрочнению стали исследования по оценке влияния ударных волн на остаточные напряжения в деталях сложной геометрической формы.

Суть проблемы состояла в том, что целый ряд факторов, связанных с неоднородностью материала изделия, технологией его изготовления, а также конструктивными особенностями вносят достаточный “запас” остаточных напряжений, существенно ограничивающих ресурс долговечности деталей машин.

Обработка ударными волнами заданной конфигурации и интенсивности, с использованием высокоимпульсных взрывчатых веществ с малой (менее миллиметра) толщиной, радикальным образом изменяет (улучшает) картину напряженного состояния.

Достаточно сказать, что снижение уровня растягивающих остаточных напряжений в зоне их концентрации достигает 50% и более от исходной величины [3].

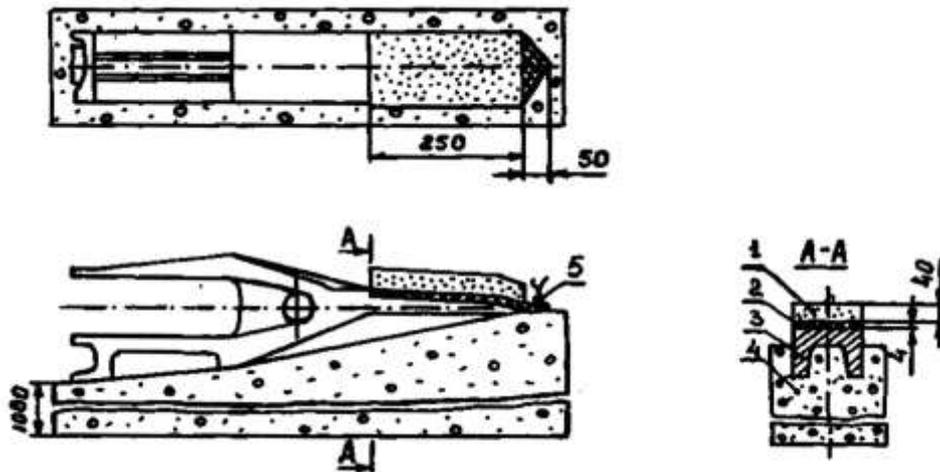


Рис.5. Технологическая схема упрочнения взрывом зубьев ковшеи экскаваторов ЭКГ-4: 1 – заряд низкоскоростного ВВ; 2 – заряд высокосортного ВВ; 3 – упрочняемая деталь; 4 – основание; 5 – капсуль-детонатор

Перспективность этих работ, как альтернативы термическим и другим способам, связана с возможностью локальной обработки практически неограниченных по весу и габаритам деталей машин и конструкций.

Синтез алмазов и регенерация сверхтвердых материалов в ударных волнах. Создание в 50-х годах трудами советских и зарубежных ученых системы сохранения продуктов ударного сжатия открыли не только новую главу в физике ударных волн, но и привели к широкому практическому применению самого способа нагружения. К числу крупнейших достижений этого направления следует отнести получение алмазов и других сверхтвердых материалов, активацию порошков с помощью ударных волн для дальнейшего использования в традиционных технологиях.

Привлекательность этого направления обусловлена необходимостью развития теоретических представлений о строении и свойствах вещества при действии экстремальных параметров, таких как температура и давление, реализуемых в природе, а также все большим проникновением высокоэнергетических способов воздействия в современные технологии.

Физическая особенность ударного сжатия материалов состоит в высокой скорости роста и спада давления, в огромной концентрации энергии, вызывающих структурные и фазовые превращения в микросекундный масштаб времени.

Особенность проводимых в университете исследований определялась разработкой различных конструкций ударного сохранения и геометрии используемых зарядов, позволяющих осуществлять плоское, цилиндрическое, коническое или сферическое виды нагружения реакционных порошков и компактных графитсодержащих материалов. Морфологические особенности и физические свойства кристаллов алмаза, структуры графитизированных материалов исследовались с применением метода ЭПР, рентгена, оптической и электронной микроскопии. Впервые было исследовано влияние различных методов обработки (ковка, взрыв, термоциклирование) чугунов с разным химическим составом и структурой матриц на параметры массопереноса углерода. Исходя из термодинамических соотношений получена приближенная теоретическая величина динамического давления, обуславливающая преобразование графита в алмаз. При этом для оценки давления впервые использованы выражения для скачка энтропии на фронте ударной волны. Полученная таким образом величина давления, равная 230 кбар, соответствует началу

фазового переходу і удивительно збігається з експериментально знайденим значенням тиску по способу розщеплення ударної хвилі.

На рис. 6 показані кристали алмазів, синтез яких був здійснений вибухом.

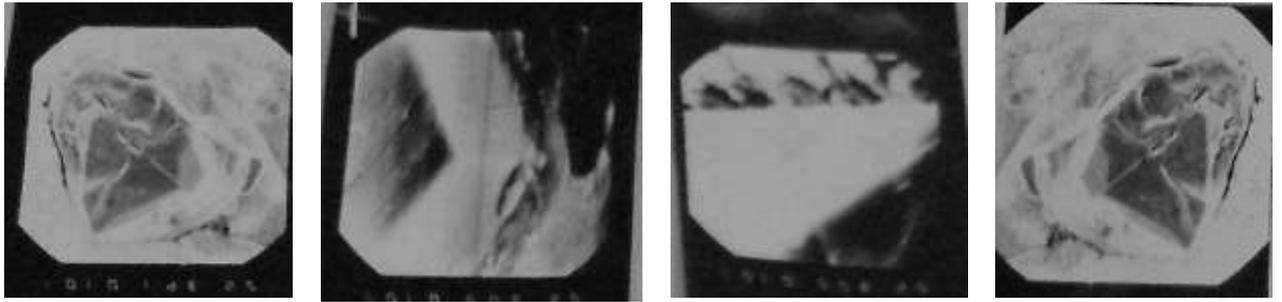


Рис. 6. Кристали алмазів, синтезованих вибухом

Проведені дослідження впливу навантаження на реакційну здатність твердосплавних масивів показали, що в оброблених матеріалах суттєво підвищується внутрішня енергія, густина різного роду дефектів, а також їх хімічна активність. Вказані особливості дозволили здійснити тонкодисперсне дроблення сплаву, виключаючи фізико-термічні і металургічні способи регенерації, при цьому тривалість процесу розмола порошку, попередньо обробленого вибухом, більше ніж в 20 разів менше порівняно з існуючою технологією розмола.

Інженерія поверхні і реновація виробів. Модифікація поверхні в напрямку суттєвого зниження шорсткості і підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин було досягнуто при спільному використанні високоенергетичної розмірної ультразвукової обробки деталей з одночасним внесенням в поверхнісні шари металу геомодифікаторів тертя.

Геомодифікатори тертя (ГМТ) – комплекс дроблених природних матеріалів, що містять мінерали ультраосновних порід, що походять на стику тектонічних платформ, використовуваних самою природою як матеріали для трибопроцесів. Спеціальним чином дроблені і пройшли стадію механоактивації тонкодисперсні порошки (розмір 0,5–1 мкм), потрапляючи в зону тертя, вносять структурні зміни в робочу поверхню, які здатні її модифікувати в трибологічно вигідному напрямку; їх використання дозволяє відновлювати зношені робочі поверхні.

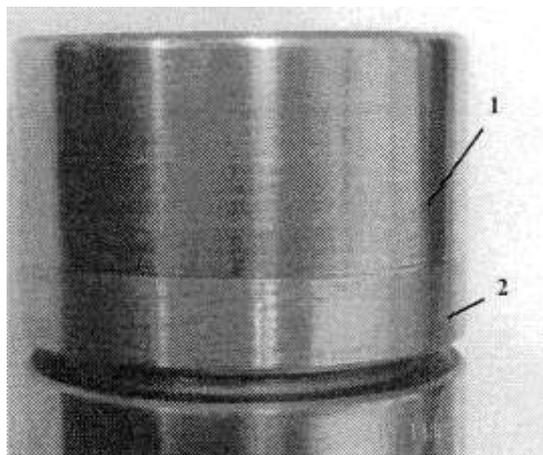


Рис. 7. Поверхність сталевого вала: 1 – без використання ГМТ; 2 – з використанням ГМТ

На металлургическом комбинате «Криворожсталь» упрочняюще-чистовой обработке были подвергнуты шейки валов (диаметром 120 мм) насосов 8НД, изготовленных из стали 30ХГСА. Сравнение и оценка с традиционными способами отделочных операций (чистовое точение и шлифование) высокоэнергетической размерной ультразвуковой обработки с одновременным внесением в поверхностные слои ГМТ показали увеличение стойкости против истирания более чем в 5 раз и существенное снижение шероховатости рабочей поверхности. На рис. 7 представлена фотография стального вала, на котором видны участки обработанной и необработанной поверхностей ГМТ.

Измерения на профилемере «TAIYSURE-5» микропрофиля поверхности дали следующие результаты: шероховатость участка вала после обработки ультразвуком уменьшилась в 3,5 раза, после обработки ультразвуком совместно с геомодификатором трения шероховатость поверхности снизилась в 6 раз.

Из приведенного анализа, иллюстрирующего возможности высокоэнергетической обработки материалов, следует, что основной концепцией развития новейших технологий должно стать обеспечение производства машин и материалов, как базы разрешения проблемы качества и конкурентоспособности наукоемкой продукции на мировом рынке.

Разумеется, представленный материал далеко не исчерпывает полноты исследований. За прошедшие годы написаны монографии, издано большое количество статей, получены сотни авторских свидетельств и патентов, защищены докторские и кандидатские диссертации. Научные работы в этой области были удостоены ряда престижных премий и признаны мировой научной общественностью. Благодаря неимоверной настойчивости, старанию и умению исполнителей эти исследования нашли достойное воплощение в науке и технике. Вот почему эту публикацию следует рассматривать как скромную дань памяти тем, кто стоял у истоков и ориентир для тех кто продолжает развитие научной школы в университете в области высокоэнергетической обработки материалов.

Список литературы

1. Дідик Р.П. Теорія і практика вибухової обробки матеріалів у національній гірничій академії України // Науковий вісник НГАУ. – 1999. - №1. – С. 70-74.