



The magnetic pulse installation, intended for hardening of cylindrical steel articles by strong pulse electromagnetic field, is developed and produced. Results of researches show high efficiency and prospects of the developed method for hardening of steel articles.

А. В. АЛИФАНОВ, А. В. АКУЛОВ, Ж. А. ПОПОВА, А. С. ДЕМЯНЧИК, ФТИ НАН Беларуси

УДК 621.983.044

МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Учеными Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси и Барановичского государственного университета разработана новая технология повышения прочностных свойств стальных изделий как закаленных, так и незакаленных путем воздействия сильным импульсным электромагнитным полем. При таком воздействии устраняются дефекты в кристаллической решетке, выравниваются внутренние напряжения, измельчается и становится более однородной структура металла [1].

Преимуществом магнитно-импульсной обработки по сравнению с известными методами упрочнения является то, что геометрические параметры и качество поверхности упрочненных изделий не меняются, не требуются дополнительная термообработка, финишные операции, сам процесс отличается низким энергопотреблением, вы-

сокой производительностью, экологической чистотой.

В ФТИ НАН Беларуси разработана и изготовлена магнитно-импульсная установка (МИУ), предназначенная для упрочнения цилиндрических стальных изделий (как незакаленных, так и закаленных) сильным импульсным электромагнитным полем.

На рис. 1 показан общий вид установки с закрытой рабочей зоной, а на рис. 2 – цилиндрический индуктор и упрочняемая деталь.

В таблице даны технические характеристики разработанной МИУ.

Характеристики МИУ

Максимальная запасаемая энергия, кДж	6,8
Максимальная энергия импульса, кДж	6,8
Максимальное зарядное напряжение, кВ	5,5
Максимальное рабочее напряжение, кВ	4,5
Емкость накопителя, мкФ	450
Средняя выходная мощность зарядного устройства, не менее ВА	500
Мощность, потребляемая установкой от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц, не более ВА	3000
Напряжение питающей сети, В	220
Частота питающей сети, Гц	50
Длина установки, мм	950
Ширина установки, мм	450
Высота установки, мм	1600
Масса установки, кг	400
Производительность импульсов/мин	1–2



Рис. 1. Магнитно-импульсная установка для упрочняющей обработки стальных изделий

Магнитно-импульсная обработка металлов основана на взаимодействии импульсного магнитного поля с металлической заготовкой. Источником импульсного магнитного поля является индуктор, через который пропускается мощный импульс электрического тока.

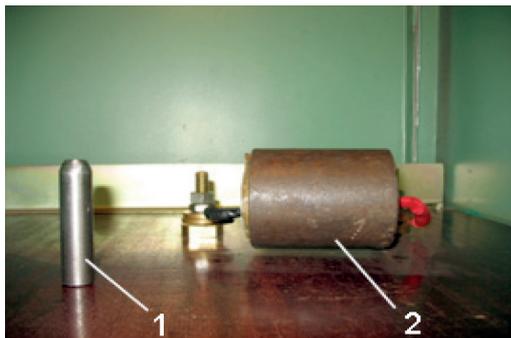


Рис. 2. Индуктор цилиндрический, установленный на рабочий стол МИУ: 1 — упрочняемая деталь; 2 — цилиндрический индуктор

Установка для магнитно-импульсной обработки металлов представляет собой генератор импульсного тока, состоящий из емкостного накопителя электрической энергии (высоковольтной конденсаторной батареи), рабочего органа (индуктора) и коммутирующего устройства (высоковольтного управляемого разрядника). С помощью разрядника производится разряд конденсаторной батареи на индуктор.

В рабочей зоне индуктора импульсное магнитное поле наводит в находящейся в нем металлической заготовке вихревые токи.

В результате взаимодействия токов индуктора и заготовки возникают мощные механические усилия, оказывающие давление как на заготовку, так и на индуктор. Под действием давления повышаются прочностные характеристики заготовки.

С помощью МИУ и цилиндрического индуктора можно подвергать упрочняющей обработке как цилиндрические, так и сферические изделия.

Однако конструкция магнитно-импульсной установки предусматривает обработку единичных изделий. В случае обработки изделий сферической формы (шариков для шарикоподшипников) необходимо подавать каждый шарик поодиночке внутрь индуктора, обрабатывать его импульсом электромагнитного поля, затем извлекать обработанный шарик и на его место подавать следующий. Такой процесс требует большого количества времени. Для ускорения процесса упрочнения шариков разработано специальное автоматическое устройство, конструкция которого схематически представлена на рис. 3.

Работает устройство следующим образом. Шарик, предназначенный для обработки (в данном случае стальные шарик диаметром 3/8 дюйма), загружаются в бункер 1, дно которого имеет конусообразную форму. В центре дна выполнено сквозное отверстие для прохода шариков.

Для устранения возможного застревания группы шариков в районе отверстия снаружи около

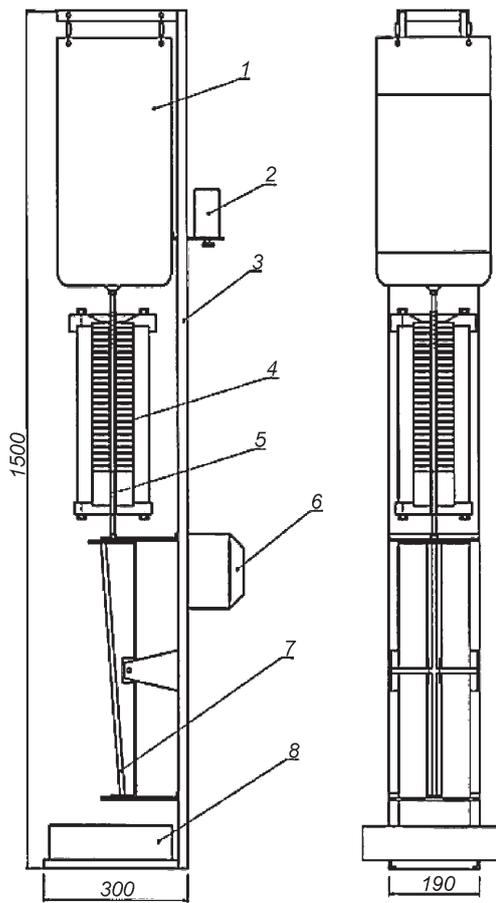


Рис. 3. Схема автоматического устройства: 1 — бункер; 2 — вибратор; 3 — рама; 4 — индуктор; 5 — изолирующая трубка; 6 — электромагнитный толкатель; 7 — дозатор; 8 — емкость для обработанных шариков

стенки бункера прикреплен вибратор 2, представляющий собой прорезиненный стальной диск, эксцентрично расположенный на валу электродвигателя. По изолирующей трубке 5 шарик под влиянием собственной массы поступает во внутреннюю полость цилиндрического индуктора 4. Изолирующая трубка предохраняет шарик от соприкосновения с внутренней поверхностью индуктора и придает обрабатываемой группе шариков (20 шт.) строго вертикальное положение вдоль оси индуктора.

С помощью электромагнитного толкателя 6 выход шариков из индуктора 4 в процессе их обработки импульсом или несколькими импульсами магнитного поля запирается дозатором 7. После окончания обработки дозатор толкателем 6 приводится в такое положение, когда его трубка совмещается с изолирующей трубкой 5 и обработанные шарик высыпаются в емкость 8. Бункер 1, вибратор 2, корпус индуктора 4, электромагнитный толкатель 6 и дозатор 7 крепятся к раме 3, которая крепится к боковой стенке магнитно-импульсной установки. Команды на электромагнитный толкатель подаются по сигналам системы управления

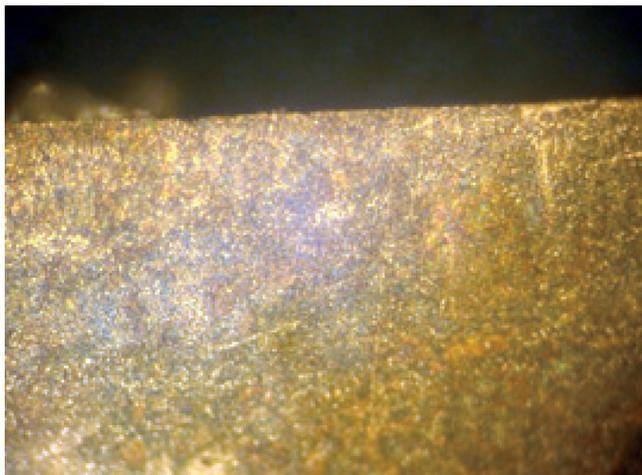


Рис. 4. Неупрочненный образец из стали 40X. $\times 100$

синхронно перед началом обработки шариков импульсным магнитным полем (дозатор перекрывает нижнее отверстие в корпусе индуктора) и после обработки (дозатор открывает выход для разгрузки обрабатываемой партии шариков).

Благодаря автоматизированной системе загрузки и выгрузки шариков магнитно-импульсной обработке подвергаются одновременно 20 шариков, а не один шарик, как было бы при отсутствии этого устройства, что значительно ускоряет процесс упрочняющей обработки.

Установлено, что при магнитно-импульсном воздействии в стальных закаленных шариках диаметром 3/8 дюйма (сталь ШХ15) происходят аустенитно-мартенситные превращения, в результате которых количество аустенита уменьшается с 8–10 до 4–6%, а также происходит измельчение зерен и образование карбидов. Эти структурно-фазовые преобразования способствуют повышению прочности шариков на 25–30%.

Подробное описание исследований изложено в [1]. Способ упрочнения металлических закаленных шариков магнитно-импульсным воздействием защищен патентом РФ [2].

В данной работе представлены результаты исследований влияния импульсного магнитного поля на структурно-фазовые превращения и прочностные характеристики изделий из конструкционных и инструментальных сталей цилиндрической и плоской формы.

Образцы из конструкционных сталей подвергали упрочняющей обработке в цилиндрическом индукторе, показанном на рис. 2.

Для исследования были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 10 мм из сталей 40X и 70Г. Термообработке образцы не подвергали. Одну плоскость подвергали шлифованию, а затем полировали.

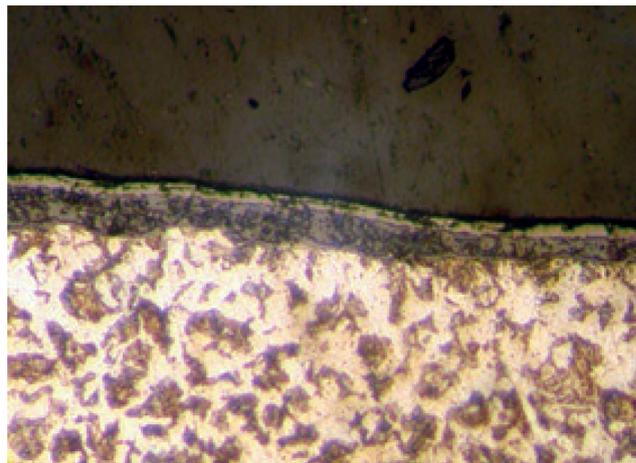


Рис. 5. Упрочненный слой образца из стали 40X, обработанного магнитно-импульсным воздействием с мощностью импульса 6 кДж. $\times 250$

В индуктор магнитно-импульсной установки одновременно закладывали по три образца из одной стали, которые подвергали обработке с определенной энергией импульса и определенным количеством импульсов.

После магнитно-импульсной обработки образцы исследовали на электронном микроскопе «Neophot-32».

На рис. 4 показана структура краевого участка образца из стали 40X, не подвергавшегося упрочняющей обработке магнитно-импульсным воздействием. Никаких отличий по краю и в центре не наблюдается.

На рис. 5 показан краевой участок образца из стали 40X, обработанного магнитно-импульсным воздействием с мощностью импульса 6 кДж.

На рисунке отчетливо виден упрочненный слой темного цвета, причем под воздействием с мощностью импульса 6 кДж он примерно в 1,5 раза толще слоя, полученного под воздействием импульса 4 кДж. Слои носят текстурированный характер. Это говорит о том, что они получены за счет пластической деформации. Структура образцов носит перлитно-ферритный характер, при этом ближе к границе упрочненного слоя преобладает перлитная структура, а в направлении к центру начинает преобладать ферритная структура.

На рис. 6 показан участок на краю образца из стали 40X, упрочненного магнитно-импульсным воздействием с мощностью импульса 6 кДж и числом импульсов 3. Средняя толщина слоя находится в пределах 50 мкм.

На фотографии отчетливо виден упрочненный слой более темного цвета на фоне неупрочненной части образца светлого цвета. В области упрочненного слоя и на некотором удалении от него были сделаны три укола индентором на компьюте-

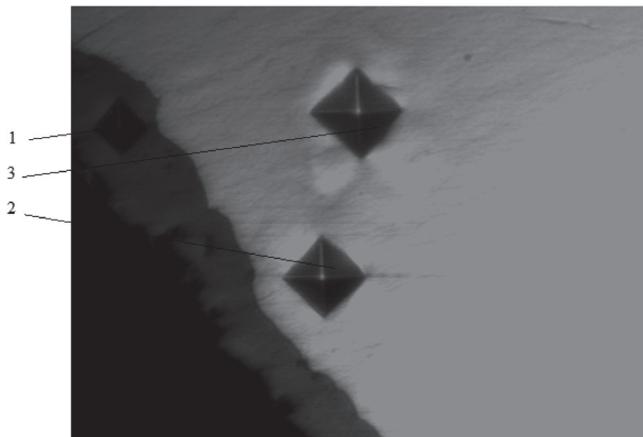


Рис. 6. Вид упрочненного слоя на образце из стали 40X с отпечатками индентора. $\times 500$

ризированной комплексе Duramin. Твердость упрочненного слоя (на границе обозначено цифрой 1) составила 4210 кгс/мм^2 . В отдалении от упрочненного слоя в точке 2 твердость составила 1910 кгс/мм^2 , а в точке 3 – 1530 кгс/мм^2 .

Отношение микротвердости упрочненного слоя (точка 1) к микротвердости неупрочненного слоя (точка 3) составляет 2,75 раза. Интерес представляет и точка 2, находящаяся на некотором удалении от четко различимой внутренней границы упрочненного слоя: микротвердость в этой точке превышает значение микротвердости в точке 3, находящейся еще дальше от границы упрочненного слоя, в 1,25 раза. Следовательно, реальный упрочненный слой имеет толщину большую, чем видно на фотографии, что можно объяснить сложным механизмом упрочнения: путем упругопластической деформации (темный слой), а также карбидообразованием, искажением кристаллической решетки и т. д.

На рис. 7, 8 показаны краевые участки образцов из стали 70Г после их обработки магнитно-импульсным воздействием.

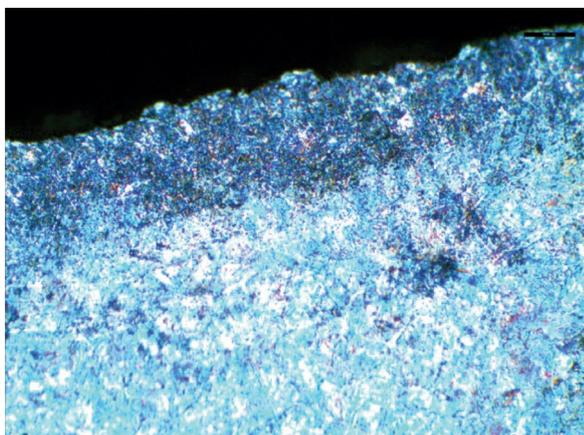


Рис. 8. Упрочненный слой образца из стали 70Г, обработанного магнитно-импульсным воздействием с мощностью импульса 6 кДж. $\times 250$

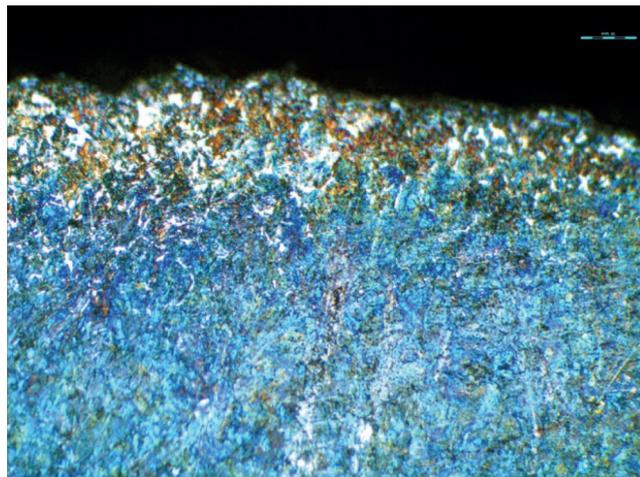


Рис. 7. Упрочненный слой образца из стали 70Г, обработанного магнитно-импульсным воздействием с мощностью импульса 4 кДж. $\times 250$

На рис. 7 показан упрочненный слой, полученный при мощности импульса 4 кДж, а на рис. 8 – при мощности импульса 6 кДж.

Из рисунка видно, что упрочненный слой проявляется не так четко, как на образцах из стали 40X, тем не менее, толщина этого слоя больше, чем у образцов из стали 40X, обработанных с энергией импульса как 4 кДж, так и 6 кДж. Средняя толщина слоя составляет 75 мкм.

При увеличении мощности импульса до 6 кДж (рис. 8) упрочненный слой проявляется более четко, его средняя толщина равна 100 мкм. В обоих случаях упрочненный слой на образцах из стали 70Г также носит деформационный характер.

В качестве плоских изделий в данной работе выбраны плоские дереворежущие ножи, широко применяемые при фрезеровании и строгании раз-



Рис. 9. Магнитно-импульсная установка для упрочнения стальных изделий



Рис. 10. Специальный индуктор для упрочнения плоских стальных изделий

личных древесных материалов. Для упрочняющей обработки плоских ножей в ФТИ НАН Беларуси была разработана новая, более мощная магнитно-импульсная установка (рис. 9), оборудованная специальным прочным столом с пазами типа «ласточкин хвост» для крепежных элементов, а также разработан и изготовлен специальный плоский индуктор (рис. 10).

Для упрочняющей обработки были выбраны дереворежущие ножи из стали 8ХФ, применяемые на УП «Мебельная фабрика «Лагуна» для обработки изделий из твердых пород древесины (дуба, ясеня), и ножи из стали 8Х6НФТ, применяемые на ОАО «Барановичдрев» для обработки изделий из сосны.

На рис. 11 показано, как комплект ножей УП «Лагуна» устанавливается на верхнюю плоскую часть индуктора, а затем через изолирующую прокладку с помощью специального приспособления прижимается к индуктору, а сам индуктор надежно прижимается к столу магнитно-импульсной установки (рис. 12).

В ходе осуществления эксперимента проводили измерения микротвердости на упрочняемой поверхности ножей, обработанных при различных величине энергии и количестве импульсов. Измерения проводили твердомером ПМТ-3 по общепринятой методике в соответствии с ГОСТ 9450-60. Среднее значение микротвердости образцов из стали 8Х6НФТ до обработки составляло 542 кгс/мм², после магнитно-импульсной обработки – 630 кгс/мм², а для стали 8ХФ до обработки – 485 кгс/мм², после магнитно-импульсной обработки – 580 кгс/мм². Анализ представленных зависимостей показывает, что микротвердость обработанных образцов увеличилась на 16–20 %.

Для изучения структуры упрочненного слоя и измерения его толщины на боковых поверхно-



Рис. 11. Установка ножей на плоский индуктор

стях дереворежущих ножей, подвергавшихся магнитно-импульсному упрочнению, были изготовлены шлифы.

Место в шлифе для проведения прицельной металлографии помечалось тремя отпечатками микротвердости, по которым можно идентифицировать определенное место в шлифе. Было проведено травление и фотографирование шлифа образцов в исходном состоянии и после магнитно-импульсной обработки. Изучение и фотографирование структур были выполнены на металлографическом микроскопе Neophot 32.

На рис. 13, 14 показаны микроструктуры в области упрочненного слоя сталей 8Х6НФТ и 8ХФ соответственно, а на рис. 13, а, 14, а – структуры в исходном состоянии, на рис. 13, б, 14, б – после магнитно-импульсной обработки.

На рис. 13, б, 14, б четко виден упрочненный слой как у образцов из стали 8Х6НФТ, так и из стали 8ХФ. Он выделяется мелкозернистостью и сильно выраженной текстурой, что характерно для деформированных слоев металла. Толщина



Рис. 12. Общий вид плоского индуктора с крепежным устройством

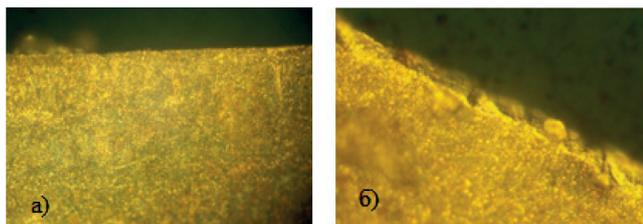


Рис. 13. Микроструктура образцов из стали 8Х6НФТ: а – в исходном состоянии; б – после обработки магнитным полем. $\times 100$

и вид упрочненного слоя зависят от энергии и количества импульсов. С уменьшением энергии в импульсе толщина слоя уменьшается и он имеет более ровный, однородный вид. С увеличением энергии толщина слоя также увеличивается и он приобретает неоднородный по глубине характер.

Измерения микротвердости по глубине образца показали, что в упрочненном слое микротвердость имеет максимальную величину, а при переходе через явно выраженную границу упрочненного слоя микротвердость заметно уменьшается, но при этом превышает микротвердость основы.

Для изучения влияния магнитно-импульсной обработки на прочностные показатели упрочненных ножей были проведены их испытания в производственных условиях. Для испытаний были выбраны ножи с максимальной микротвердостью упрочненной поверхности: для стали 8Х6НФТ она достигалась при энергии 6 кДж и 3 импульсах, а для стали 8ХФ – при энергии 6 кДж и 4 импульсах.

На ОАО «Барановичдрев» ножи, изготовленные из стали 8Х6НФТ и упрочненные магнитно-импульсным воздействием, прошли опытно-промышленные испытания на четырехстороннем фрезерном станке Yumat на операции фрезерования брусков для оконных створок из древесного материала «сосна клееная» в течение 2 мес. и показали стойкость, в 3 раза превышающую стойкость таких же ножей, использованных на этой операции, но не упрочненных магнитно-импульсным методом.

Ножи, изготовленные из стали 8ХФ и упрочненные магнитно-импульсным воздействием, прошли опытно-промышленные испытания на УП «Мебельная фабрика «Лагуна» на фрезерном дере-

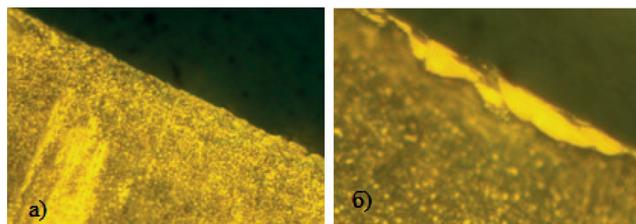


Рис. 14. Микроструктура образцов из стали 8ХФ: а – в исходном состоянии; б – после обработки магнитным полем. $\times 100$

вообрабатывающем станке ФШС1А на операции фрезерования плоскостей ножек стульев из твердых древесных пород «ясень» и «дуб». За период работы в течение 2 недель опытные ножи показали стойкость, более чем в 1,5 раза превышающую стойкость таких же ножей, не упрочненных магнитно-импульсной обработкой (определялась стойкость ножей до их перезаточки). Кроме того, установлено, что качество обрабатываемых поверхностей деталей улучшилось: снизилась шероховатость, отсутствуют сколы и подрывы древесины, также отмечена плавность хода ножей и образование при обработке более мелкой (дробной) стружки, что в совокупности благоприятно сказывается на качестве изделия и снижает энергоемкость процесса резания.

После проведения производственных испытаний были исследованы режущие кромки ножей, не упрочненных и упрочненных магнитно-импульсным воздействием. Установлено, что режущие кромки упрочненных ножей практически не затупились, чем можно объяснить и приведенные выше положительные эффекты.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают высокую эффективность и перспективность разработанного метода для упрочнения стальных изделий, изготовленных из конструкционных и высоколегированных инструментальных сталей. В то же время установлено, что выбор режимов магнитно-импульсной обработки зависит от состава и процентного содержания легирующих элементов, углерода и других факторов, что требует проведения дальнейших исследований.

Литература

1. Алифанов А. В., Анисович А. Г., Амелянчик С. А., Кривонос Ю. И. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий // Материалы 9-й Междунар. практ. конф. «Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки», 10–13 апреля 2007 г., СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2007. В 2-х ч. Ч. 1.
2. Способ упрочнения металлических закаленных шариков: пат. 11580 Респ. Беларусь / А. В. Алифанов, В. Н. Алехнович, А. А. Лях, Е. С. Амелянчик, Ю. И. Кривонос. Заявитель ФТИ НАН Беларуси; опубли. в бюллетене. 2009. № 1.