

УДК 621.787.4:621.882

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОБЪЕМНОГО И ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

*Б.И.Бутаков, доктор технических наук, профессор
Николаевский государственный аграрный университет*

Описано способи дегазації, рафінування й здрібнювання зерна литого металу застосуванням електророзрядних вібраторів у процесі його кристалізації з метою підвищення міцності деталей по всьому їхньому поперечному перерізі. Для підвищення ефективності зміцнення поверхневого шару деталей розроблено способи сполученого чистового й зміцнюючого обкатування їх роликми та електромеханічного зміцнення.

Для повышения ударной вязкости сталей, усталостной прочности ответственных деталей больших размеров разработан и внедрен в производство метод электрогидроимпульсной обработки металлов и сплавов в жидком состоянии и в процессе их кристаллизации.

Для повышения усталостной прочности деталей, в которых трещины образуются в поверхностных слоях, износостойкости узлов трения, снижения смятия поверхностных слоев от повышенных контактных напряжений разработан метод поверхностного пластического деформирования с совмещением чистового и упрочняющего обкатывания роликами и способ импульсного электромеханического упрочнения деталей.

Метод объемного упрочнения металлов и сплавов электрогидроимпульсной обработкой их в жидком состоянии

С целью дегазации, рафинирования и уменьшения макро- и микронеоднородности структуры поковок и отливок разработан и нашел практическое применение метод электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) жидкого металла в ковше ударными импульса-

ми, создаваемыми вибраторами, работающими на основе применения электрогидравлического эффекта [1, 2].

При электрогидроимпульсной обработке (ЭГИО) электроразрядные вибраторы поджимают или непосредственно к поверхности затвердевающей заготовки во вторичной зоне охлаждения при непрерывной разливке стали, или к стенке изложницы, или волну сжатия от пластины вибратора передают через волновод в жидкий металл, залитый в ковш. При вакуумно-дуговом переплаве пластина вибратора, излучающая волну сжатия, является поддоном, на который наплавается слиток. Для оптимизации режимов ЭГИО и изучения механизма измельчения зерна нами измерены сила удара пластины вибратора по обрабатываемому металлу, давление, скорость и интенсивность в волне сжатия, создаваемой электроразрядным вибратором.

Для определения давления, скорости и интенсивности в волне сжатия, создаваемой электроразрядным вибратором при наличии больших импульсных электромагнитных полей, автором применен метод мерных стержней Гопкинсона [3]. На шлифованную поверхность пластины вибратора, покрытую тонким слоем смазочного материала, устанавливали мерные стержни со шлифованными торцами (см. рис. 1). Волна сжатия, генерируемая в пластине вибратора при высоковольтном пробое (рис. 1, а), распространяется со скоростью $C = \sqrt{E/\rho}$ (E — модуль продольной упругости и ρ — плотность стали), проходит через контакт стержня с пластиной, доходит до верхнего торца (рис. 1, б), отражается от него и в виде волны растяжения (см. рис. 1, в, штриховая линия) идет к пластине вибратора. Жирной линией показана суммарная волна давления p в стержне. Когда суммарное давление на поверхности вибратора будет растягивающим и превысит массу стержня (рис. 2, г), последний переместится вверх на величину h со скоростью $v_{cp} = \sqrt{2gh}$, где g — ускорение свободного падения.

Количество движения (импульс силы, захватываемый стержнем) определяли по формуле

$$Pt = mv_{cp}, \quad (1)$$

где p — сила на торце стержня, Н;

t — время, с, за которое волна сжатия пройдет расстояние, равное удвоенной длине стержня-груза, $2l_{сп}$

$$t = 2l_{сп} / C, \quad (2)$$

где $C = 5 \cdot 10^3$ м/с.

Были приняты стержни различной длины ($l_{сп} = 12,5; 25; 50; 100; 200; 400$ мм) и диаметром $d_{сп} = 40$ мм (погонная масса $0,01$ кг/мм длины). Высоту подъема грузов разной длины, следовательно, и разной массы фиксировали визуально относительно линейки с ценой деления 1 мм.

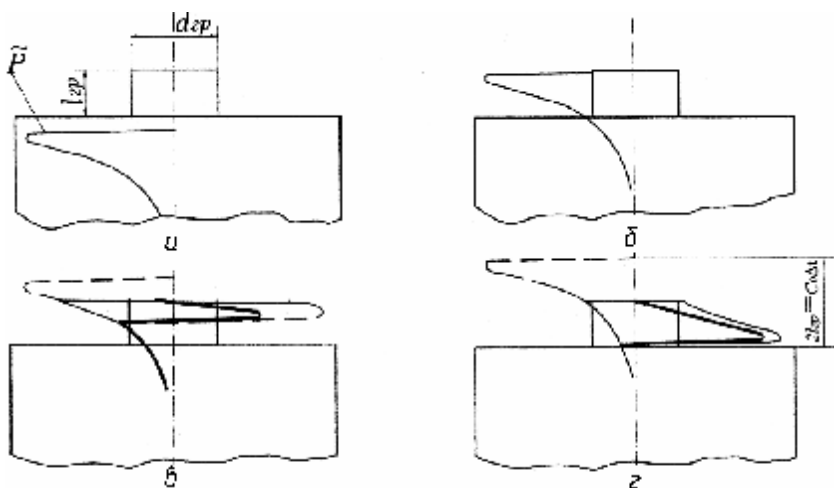


Рис. 1. Схема прохождения волны сжатия по мерному стержню:

\tilde{P} — среднее давление на торце стержня

Для груза диаметром 40 мм в соответствии с формулами (1) и (2) определяют силу на его торце $P = 108\sqrt{h}$, кН (h , м); находят среднее давление на торце груза

$$\tilde{p} = 4P / \pi d_{ep}^2 \approx 86\sqrt{h} . \quad (3)$$

Среднюю скорость в волне сжатия определяют как половину скорости вылета груза:

$$\tilde{v} = v_{ep} / 2 = 2,20\sqrt{h} . \quad (4)$$

Средняя интенсивность в волне сжатия

$$\tilde{I} = \tilde{v} \tilde{p} = 190h . \quad (5)$$

Градиент среднего давления в волне сжатия на ее переднем фронте можно рассчитать по формуле

$$grad \tilde{p} = \tilde{p} / 2l_{ep \min} = 43\sqrt{h} / l_{ep \min} .$$

При $l_{ep \min} = 12,5$ мм

$$grad \tilde{p} = 3,4\sqrt{h} . \quad (6)$$

При передаче ударного импульса непосредственно пластиной в обрабатываемую среду (например, при вакуумно-дуговом переплаве сплавов), учитывая волновые сопротивления ρC материала пластины и обрабатываемой среды, коэффициент отражения на границе пластина — обрабатываемая среда в соответствии с работой [4] определяют по формуле

$$K = \frac{\rho_n C_n - \rho_c C_c}{\rho_n C_n + \rho_c C_c} , \quad (7)$$

где ρ_n и C_n — соответственно плотность материала пластины и скорость звука в нем;

ρ_c и C_c — соответственно плотность обрабатываемой среды и скорость звука в ней.

При вакуумно-дуговом переплаве титановых сплавов на медном охлаждаемом поддоне, являющемся пластиной вибратора, коэффициент отражения волны сжатия при $\rho_n C_n = 33 \cdot 10^5$ г/см²·с и $\rho_c C_c = 22,9 \cdot 10^5$ г/см²·с $K = 0,18$, т. е. амплитуда давления в

волне сжатия уменьшится при переходе ее из меди в титановый сплав на 18%. С учетом значений волновых сопротивлений для стали и алюминиевых сплавов (39,4 и 13,7 г/см²·с соответственно) следует рекомендовать при ЭГИО в ковше жидкой стали применение стального волновода, а при ЭГИО алюминиевых сплавов — волновода из титановых сплавов. При этом коэффициент отражения волны сжатия, рассчитанный по формуле (7), для первого случая (волновое сопротивление жидкой стали $\rho_c C_c = 7,35 \cdot 5 \cdot 10^5 = 36,5 \cdot 10^5$ г/см²·с) $K = 0,05$ и для второго случая $K = 0,25$. В таблице приведены средние значения давления, скорости, интенсивности и градиента давления в волне сжатия для методов внешнего физического воздействия на процесс кристаллизации сталей. Для ЭГИО приведены данные расчета характеристик волны сжатия по формулам (3)-(7) для вибратора со стальной пластиной толщиной $\delta = 10$ мм, диаметром 185 мм при энергии разряда $Q = 0,625$ кДж, зарядном напряжении $U = 50$ кВ, емкости конденсаторов ГИТ, $c = 0,3$ мкФ, индуктивности разрядного контура $L = 10$ мкГн, высоковольтном разряде на пластину, межэлектродном промежутке $l_p = 50$ мм. Для гармонических синусоидальных колебаний при низкочастотной вибрации, электромагнитном перемешивании и ультразвуке градиент давления $grad \tilde{p}$ рассчитывают по формуле

$$grad \tilde{p} = 2\pi f p_{\max} / C, \quad (8)$$

где p_{\max} — амплитуда колебаний давления, МПа;

f — частота колебаний, Гц.

При использовании мощных ультразвуковых генераторов удастся получить интенсивность колебаний J до 300 Вт/см² [5].

Применив зависимость $\tilde{p} = \tilde{v} \rho C$ с учетом (5), имеем $\tilde{p} = \sqrt{\tilde{J} \rho C}$; для стали получим $\tilde{p} = 10,8$ МПа; $\tilde{v} = 0,3$ м/с. Такое давление не может создать фактическое переохлаждение расплава, при котором могли бы образоваться дополнительные центры кристаллизации. В соответствии с работой [6] при давлении 1 МПа

переохлаждение составит $(3-5) \cdot 10^{-2}$ К. Поэтому для ультразвуковой обработки в качестве основных факторов воздействия на процесс кристаллизации считают наличие кавитации в расплаве и акустических потоков. Кавитация приводит при захлопывании кавитационных каверн к образованию микроударных волн, способствующих дроблению кристаллов, образованию новых центров на активированных за счет ударных волн нерастворимых примесях. Акустические потоки приводят к перемешиванию и диспергированию кристаллов. Более мощное воздействие по сравнению с ультразвуком на процессы диспергирования кристаллов, их зарождения и перемешивания расплава осуществляется при ЭГИО. На излучающей стальной пластине электроразрядного вибратора создается волна сжатия интенсивностью $J = 200 \cdot 10^3$ Вт/см² (см. таблицу), что на два-три порядка выше интенсивности ультразвуковой волны. Давление в волне сжатия достигает значений $\tilde{p} = 288$ МПа, скорость $\tilde{v} = 7$ м/с. При этом давлении фактическое переохлаждение расплава составит 8.5 – 14 К. В этом случае возможно появление новых центров кристаллизации в расплаве. Градиент давления (до 11 МПа/мм) на переднем фронте волны сжатия вызывает дробление кристаллов без кавитации, особенно на границе твердой и жидкой фаз. Таким образом, импульсное введение энергии в жидкий и кристаллизующийся металл при ЭГИО создает возможность обрабатывать большие массы металла (50 т и более) с малыми энергетическими затратами (2-10 МДж на 1 т расплава). По удельным энергетическим затратам ЭГИО имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными методами внешнего физического воздействия. Волна давления, генерируемая в расплав с помощью волновода, создает в расплаве кавитацию и повышает однородность расплава. ЭГИО влияет на физические свойства расплавов: функцию радиального распределения атомов, вязкость, поверхностное натяжение, скорость диффузии химических элементов [7, 8].

Установки для ЭГИО жидкой стали в ковшах емкостью от 6 до 30 т успешно эксплуатировались на Черноморском, Балтийском и Северодвинском судостроительных заводах [2, 7, 8]. ЭГИО

сталей обеспечивает удаление водорода на 30-65%, удаление неметаллических включений на 15%, измельчение их и равномерное распределение. Это обеспечило повышение ударной вязкости ряда сталей в среднем на 30%, исключило появление в уникальных отливках горячих трещин [9].

Таблица

Давление, скорость, интенсивность, градиент давления в волне сжатия

Методы внешнего физического воздействия	Частота импульсов или колебаний f , Гц	Давление \bar{p} , МПа	Скорость \bar{v} , м/с	Интенсивность J , Вт/см ²	Градиент давления $\text{grad } \bar{p}$, МПа/мм
Низкочастотная вибрация	50	4,7	0,1	60,0	2,6·10 ⁻⁴
Электромагнитное перемешивание	50	36,4	1,0	3540,0	2·10 ⁻³
Ультразвук	20000	10,8	0,28	300	3·10 ⁻¹
ЭГИО	-	288,0	7,0	200·103	11,5

Метод упрочнения деталей с помощью поверхностного пластического деформирования и электромеханического воздействия

Одним из методов повышения эксплуатационных свойств деталей, которые компенсируют дефекты заготовки и механической обработки, является поверхностное пластическое деформирование (ППД). С помощью ППД деталей в процессе их механической обработки достигают в поверхностном слое большую степень наклепа (до 100%), высокий уровень остаточных сжимающих напряжений (до 250 МПа), получают шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,1-0,16$ мкм. Это способствует повышению усталостной прочности деталей и износостойкости пар трения [10].

Одной из основных задач ППД является решение вопроса совмещения чистой и упрочняющей обработки. Для упрочняющего и чистового обкатывания стальных деталей широко применяют устройства с торообразным роликом. Установлено, что при

больших углах вдавливания ролика на обкатанной поверхности детали появляется волнистость с шагом, отличным от величины подачи ролика. При этом торцовое биение ролика считают в качестве основной причины появления волнистости [11].

При упрочняющем обкатывании тонкий поверхностный слой, для исключения волнистости поверхности после обкатывания или стачивают, что существенно уменьшает эффективность упрочнения, а при чистовом обкатывании для предотвращения появления волнистости ограничивают задний угол вдавливания ролика в плоскости подачи φ_a до $2-3^\circ$, что, однако, ограничивает чистовой эффект обкатывания параметром шероховатости $10 \leq R_z \leq 40$ мкм.

Нами установлено, что силы трения в опорах, складываясь с рабочим усилием пружинящего элемента обкатного устройства, влияют на величину усилия P обкатывания; при наличии же радиального биения ролика силы трения в процессе обкатывания становятся переменными по величине и направлению. Это позволяет предположить, что основной причиной появления волнистости является наличие колебания усилия P обкатывания при каждом обороте ролика в результате его радиального биения [10]. Заменой опор скольжения, на которых обычно установлены роликовые узлы в устройствах для обкатывания роликами, подшипниками качения, в которых коэффициент трения не превышает значения равного 0,008, удастся стабилизировать усилие на ролике и исключить появление волнистости на обкатанной поверхности. Это позволило совместить чистовое и упрочняющее обкатывание деталей роликами и значительно повысить эффективность их упрочнения.

Обкатывание роликами за счет пластического деформирования сопровождается наклепом поверхностного слоя (повышаются твердость на 40-60%, условный предел текучести — до 100%), это способствует замедлению процесса смятия поверхностного слоя стальных деталей, эксплуатирующихся при больших контактных нагрузках.

Разработаны и внедрены на ряде заводов устройства для обкатывания роликами штоков и плунжеров с целью повышения их износостойкости и износостойкости работающими с ними в паре уплотнений, винтов с большим шагом для повышения износостой-

кости винтовых пар. Разработаны и внедрены в производство технологии ППД рабочих поверхностей ручьев канатных блоков, сминаемых канатами, шеек валов для уменьшения смятия их поверхности внутренними кольцами подшипников качения [12, 13].

При электромеханическом упрочнении стальных деталей вращения твердосплавными роликами при пропускании через пятно контакта электрического тока (сила тока, $I = 300-2000$ А, напряжение $U = 2,5-6,0$ В) глубина упрочненного (белого) слоя составляет $0,05-1,5$ мм [14]. Под белым слоем чаще всего возникают остаточные растягивающие напряжения, которые снижают усталостную прочность упрочненных деталей, поэтому для устранения отрицательного влияния растягивающих напряжений применяют комбинированную технологию. Электромеханической обработке предшествует поверхностное пластическое деформирование (ППД) обкатыванием роликами. В результате этого остаточные растягивающие напряжения преобразуются в сжимающие. Однако это значительно усложняет технологию упрочнения.

Нами разработано устройство для электромеханического упрочнения деталей с помощью высоковольтного импульсного разряда в жидкости, позволяющее получать глубину упрочненного слоя до 25 мм, создавать в поверхностном слое остаточные сжимающие напряжения и регулярный микрорельеф обрабатываемой поверхности [15].

Устройство для электромеханической обработки деталей вращения показано на рис. 2. Устройство состоит из электроразрядной камеры 1 с положительным электродом 2, соединенным с генератором импульсных токов (ГИТ) 3. Рабочий торец камеры 1 выполнен в виде пуансона 4 с профильным радиусом R . Корпус камеры 1 соединен с рамой 5, на противоположном конце которой закреплена камера-гидроцилиндр 6, в качестве торца которой служит пуансон 7. В расточках пуансонов 4 и 7 установлены уплотнительные кольца 8 и 9. К пуансонам 4 и 7 прикреплены оси 10 и 11, на которых установлены пружины 12 и 13. Электроразрядная камера 1 и камера-гидроцилиндр 6 соединены между собой гидроканалом 14. Рама 5 установлена на суппорте токарного станка, в центрах которого установлена обрабатываемая деталь 15. Пуансон 7 электрически соединен с отрицательным полюсом ГИТ 3. Электроразрядная

камера 1 и камера-гидроцилиндр 6 заполнены рабочей жидкостью (водой с электрическим сопротивлением не менее 15 Ом·м). После установки детали 15 в центрах токарного станка при включении насоса через электроразрядную камеру 1 и камеру-гидроцилиндр 6 прокачивается вода под давлением, обеспечивающим поджим пуансонов 4 и 7 к обрабатываемой детали. При этом пружины 12 и 13 сжаты. Включается вращение детали 15 со скоростью $V_{об}$ и подача суппорта станка вдоль оси детали 15. При включении ГИТ 3 к электроду 2 подается высокое напряжение, осуществляется пробой водного промежутка длиной l_p , между электродом 2 и торцом пуансона 4 протекает импульсный ток и образуются канал разряда, представляющий собой низкотемпературную плазму, и парогазовая полость. Импульсный ток протекает через поверхность контакта пуансонов 4 и 7 с деталью 15 и электрическое соединение с отрицательным полюсом ГИТ 3. При этом импульсный ток разогревает поверхностный слой детали до $\approx 900^\circ\text{C}$ и за счет отвода тепла в массу осуществляется закалка поверхностного слоя. При расширении парогазовой полости создается квазистатическое давление P_m , передаваемое через пуансоны 4, 7 и обрабатываемую деталь 15. Осуществляется пластическая деформация поверхностного слоя детали на глубину δ_M . Высоковольтные импульсы следуют с частотой f_H , деталь поворачивается за каждый импульс на величину $S_{кр}$. По окончании обработки выключаются ГИТ 3 и насос подачи воды в разрядную камеру, прекращается вращение детали 15 и подача суппорта станка. С помощью пружин 12 и 13 пуансоны 4 и 7 отводятся от детали 15.

На поверхности упрочняемой детали создается вначале тепловой импульс за счет прохождения через поверхность контакта с деталью импульсного тока, возникающего при высоковольтном пробое в разрядной камере. Из-за резкого отвода тепла в массу детали на ее поверхности создается термически упрочненный слой глубиной δ_T . Затем за счет расширения парогазовой полости в разрядной камере создается и передается на торец пуансона ударный импульс давлением P_m , обеспечивающий пластическую деформацию поверхностного слоя детали на глубину δ_M , материал детали подвергается холодному наклепу, в поверхностном слое

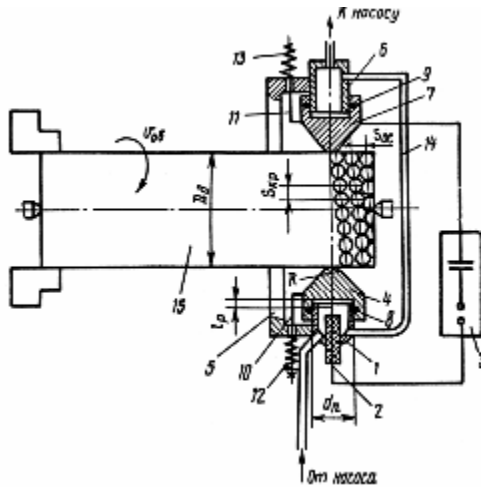


Рис.2. Устройство для электромеханического упрочнения деталей вращения

возникают остаточные сжимающие напряжения, на поверхности детали в результате круговой $S_{кр}$ и осевой $S_{ос}$ подачи создается регулярный микрорельеф поверхности.

Глубина термического упрочнения:

$$\delta_T = (1,8 - 3,0) \cdot 10^{-4} \cdot U_0^{2/3} \cdot C^{1/2} \cdot R_K^{1/3} \cdot L^{-1/6}, \text{ м}, \quad (9)$$

где U_0 — зарядное напряжение ГИТ, В;

C — емкость конденсаторов ГИТ, Ф;

L — индуктивность разрядного контура, Г;

R_K — электрическое сопротивление поверхности контакта пуансона с упрочняемой деталью, Ом.

Глубина механического упрочнения и залегания остаточных сжимающих напряжений:

$$\delta_M = 10^2 \cdot C^{-1/24} \cdot U_0^{1/6} \cdot L^{-1/8} \cdot \eta^{1/4} \cdot d_n \cdot \sigma_T^{-1/2}, \text{ м}, \quad (10)$$

где η — электроакустический КПД разряда, $\eta = 0,01 - 0,05$;

d_n — диаметр пуансона, м;

σ_T — предел текучести упрочняемого металла, Па.

На поверхности детали возникает так называемый белый слой. Глубина упрочненного слоя, в зависимости от напряжения и емкости конденсаторов ГИТ, может достигать 15-20 мм, а толщина белого (закаленного) слоя до 0,4 мм, что приводит к увеличению усталостной прочности деталей и повышению их износостойкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутаков Б. И. Методы динамического упрочнения металлов и сплавов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – №7. – С.7-11.
2. Бутаков Б.И., Ковальский Ю.В., Корытов В.А. О стойкости волноводов для обработки расплавов волнами напряжений // Сталь. – 1993. – № 9. – С.70-71.
3. Кольский Г. Волны напряжений в твердых телах. – М.: ИЛ., 1955. – 192 с.
4. Поздеев В.А., Царенко П.И., Бутаков Б.И. и др. Электроразрядные гегераторы упругих колебаний. – К.: Наукова думка, 1985. – 176 с.
5. Абрамов О. В., Хорбенко И. Г., Швегла Ш. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение – Братислава: Альфа, 1984. – 276 с.
6. Чалмерс Б. Теория затвердевания. – М.: Металлургия, 1968. – 288 с.
7. Базин Ю.А., Бутаков Б.И., Баум Б.А. и др. Влияние электрогидроимпульсной обработки на структуру ближнего порядка расплава многокомпонентного сплава на основе алюминия // Расплавы. – 1992. – №3. – С.89-91.
8. Ершов Г.С., Кличановский В.И., Бутаков Б.И. и др. Влияние электрогидроимпульсной обработки (ЭГИО) на свойства металлических расплавов // Металлы. – 1993. – № 3. – С.17-20.
9. Корытов В.А., Гостева И.А., Бутаков Б. И. Виброимпульсная обработка стали в разливочном ковше – эффективный метод повышения трещиностойкости литого металла // Сталь. – 1995. – № 5. – С.38-42.
10. Бабеи Ю. И., Бутаков Б. И., Сысоев В. Г. Поверхностное упрочнение металлов. – К.: Наукова думка, 1995. – 256 с.
11. Браславский В. М. Технология обкатки крупных деталей роликами. – М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.
12. Бутаков Б.И., Артюх В.А., Анисимов О.А., Удодов А.Т. Повышение долговечности изделий с помощью поверхностного пластического деформирования // Тяжелое машиностроение, – 2006. – №9. – С.26-32.
13. Бутаков Б.И., Третьяк М.Ю., Овчинников Ю.Г. и др. Повышение эффективности реновации металлических деталей путем совмещения чистового и упрочняющего обкатывания роликами // Вестник машиностроения, – 2004. – № 7. – С.59-67.
14. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электро-механической обработкой. – М.: Машиностроение, 1968. – 164 с.
15. А.С. 1545432 СССР, В 24 В 39/02. Способ ударно-упрочняющей обработки поверхностей деталей и устройство для его осуществления / Б.И. Бутаков // Открытия. Изобретения. – 1989.