

и в этом случае параметры соударения практически во всех экспериментах лежат вне области I (см. рис. 3).

Из приведенных результатов и анализа области применимости гидродинамической модели в качестве общего заключения можно сделать следующий вывод. Для того чтобы корректно сравнивать экспериментальные результаты различных авторов между собой, результаты экспериментов с выводами теории, а также выводы различных теоретических концепций, необходимо предварительно установить, совпадают ли области параметров соударения (в плоскости $\gamma - U$), в которых выполнены эксперименты, совпадает ли область применимости теории с областью проведения экспериментов, а также области применимости различных теоретических концепций. Очевидно, что если совпадения нет, то и сравнение неправомерно.

Поступила в редакцию 12/V 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерibas. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
2. В. М. Кудинов, А. Я. Коротеев. Сварка взрывом в металлургии. М.: Металлургия, 1978.
3. А. В. Уткин, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1980, 16, 4.
4. С. К. Годунов, И. Н. Сергеев-Альбов. ПМТФ, 1979, 3.
5. S. R. Reid, N. H. S. Sherif. J. Mech. Engin. Science, 1976, 18, 2.
6. Ю. А. Гордополов, А. Н. Дремин, А. И. Михайлов. ФГВ, 1976, 12, 4.
7. J. L. Robinson. Phil. Mag., 1975, 31, 3.
8. Ю. А. Гордополов, А. Н. Дремин, А. И. Михайлов. ФГВ, 1978, 14, 4.
9. G. R. Cowan, O. R. Bergmann, A. H. Holtzman. Metal. Trans., 1974, 2, 41.
10. H. Sato, K. Kuriki. J. Fluid Mech., 1961, 11, 321.
11. N. J. Zabusky, G. S. Deem. J. Fluid Mech., 1974, 47, 2.
12. Л. М. Мили-Томсон. Теоретическая гидродинамика. М.: Мир, 1964.
13. А. А. Дерibas. II Международный симпозиум по обработке металлов взрывом. Т. 1. Мариамске Лазне. ЧССР. 1973.
14. А. Н. Михайлов, А. Ф. Беликова, А. Н. Дремин. О времени развития процесса волнообразования при косом столкновении металлических пластин. ВИНТИ, отд. науч. фондов, № 1808-80, деп. 07.05.80.
15. A. Bahrani, T. Black, B. Crossland. Proc. Roy. Soc., Ser. A, 1967, 296, 1445.
16. Th. von Karman, H. Rubach. Phys. Zeit., 1912, 13, 49.
17. А. В. Уткин, Ю. А. Гордополов, А. И. Михайлов. ФГВ, 1979, 15, 3.
18. В. В. Ефремов, И. Д. Захаров. ФГВ, 1976, 12, 2.
19. С. К. Годунов, А. А. Дерibas, В. И. Мали. ФГВ, 1975, 11, 1.

УДК 621.793

НАНЕСЕНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВЗРЫВОМ ПРОВОДНИКОВ

А. А. Дерibas, В. П. Исаков, Б. М. Крейчман, В. С. Таран,
В. Н. Филимоненко
(Новосибирск)

Из всего многообразия методов нанесения покрытий особо следует выделить высокоскоростные импульсные способы (детонационно-газовое [1], лазерное импульсное [2], с помощью импульсных плазменных высокоэнергетических источников [3] и электрического взрыва проводников [4]), когда скорость роста покрытия достигает $10^8 - 10^{10}$ Å/с [5].

Основные особенности перечисленных методов: 1) перевод в плазменное состояние за малое время (менее 1 мс) почти всего испаряемого материала; 2) достижение высоких температур плазмы испаряемого вещества (до 10^5 К) [6]; 3) малые времена ввода энергии обуславливают большие скорости потоков испаряемого вещества (до 1,5 км/с)

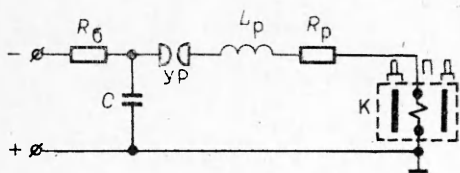


Рис. 1. Установка по нанесению покрытий методом электрического взрыва проводников.

К — камера; L_p, R_p — распределенная индуктивность и сопротивление цепи; УР — управляемый разрядник; П — взрываемый проводник.

[4—5]). Подобные свойства потоков обеспечивают малые времена контакта распыляемой частицы (массой $\sim 10^{-10}$ кг) с подложкой и высокие напорные давления (до 1000 кг/мм^2).

Из перечисленных методов электрического взрыва проводников обладает рядом особенностей, которые обеспечивают его преимущество при выполнении некоторых технологических операций, а именно: возможность нанесения покрытий на внутренние поверхности труб, втулок, каналов и сложных профилей, нанесение композитных покрытий из чередующихся слоев разнородных материалов без изменения и с изменением фазового состава взрываемого проводника, возможность проведения синтеза новых соединений в процессе нанесения, нанесение покрытий на неметаллические материалы. Из-за малого времени воздействия высокоэнергетической плазмы на изделие (порядка 10 мкс) тонкостенные хрупкие детали не деформируются и им не передается высокий тепловой импульс.

Настоящая работа преследует цель обобщить особенности нанесения износостойких покрытий методом электрического взрыва проводников на детали различной формы. Рассматриваются также перспективы развития метода.

Эксперименты по нанесению покрытий проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1. Источник питания через зарядное сопротивление R_0 заряжает конденсаторную батарею C до напряжения U_0 . Накопленная в накопителе энергия коммутируется через разрядник на проводник. При выполнении определенных условий, характеризующих разрядный контур RC , условия окружающей среды и параметры проводника, он взрывообразно разрушается, в результате образуются пары и капли материала, разлетающиеся с большой скоростью. При своем движении продукты взрыва подвергаются воздействию плазмы газового разряда и осаждаются на деталь D , образуя покрытие.

Особенность покрытий при электрическом взрыве проводников состоит в том, что они в отличие от других способов формируются при воздействии нескольких тепловых источников, действующих на различных стадиях процесса. Электрическая энергия, подводимая к проводнику, преобразуется в тепловую энергию продуктов взрыва, кинетическую энергию ударной волны и продуктов взрыва, энергию светового излучения газового разряда, ударной волны и нагретых частиц [7]. Определенные доли указанных видов энергий вводятся в деталь до начала конденсации продуктов взрыва, во время и после завершения конденсации, оказывая различное влияние на формирование покрытий. Поэтому для понимания процесса необходим сложный электрофизический комплекс, регистрирующий состояние проводника от начала ввода энергии в проводник до ее полного рассеивания в пространстве и детали (подложке).

В экспериментах использовались два типа емкостных накопителей, параметры которых приведены ниже, где E , U , C , T означают запасенную энергию, зарядное напряжение, емкость и период разряда батареи при коротком замыкании:

Номер батареи	E , кДж	U , кВ	C , мкФ	T , мкс
I	50	5	4000	150
II	24	40	30	15

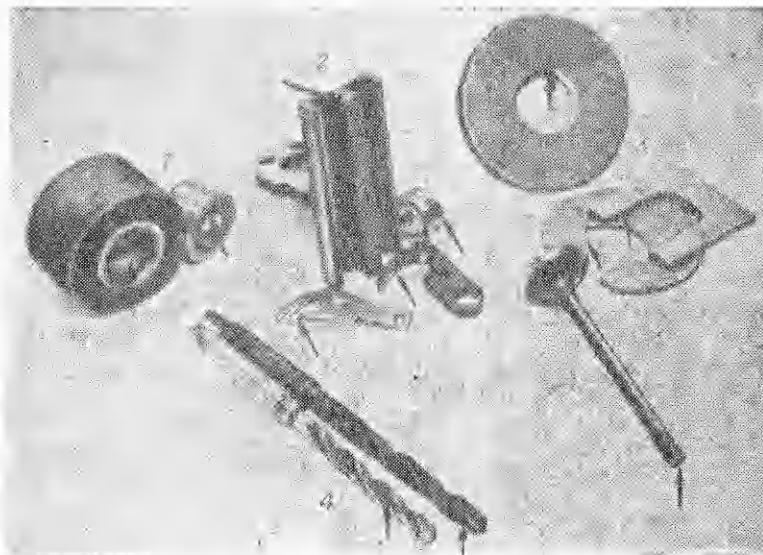


Рис. 2. Детали, на которые наносились покрытия (покрытые поверхности указаны стрелкой).

1 — вытяжной инструмент; 2 — детали ткацких станков; 3 — мерительный инструмент; 4 — режущий инструмент.

Коммутация батареи I осуществлялась вакуумным разрядником, а батареи II — двенадцатью многоззорными воздушными разрядниками. Для уменьшения интенсивности звуковой волны и возможности работы в различных средах и в вакууме проводник (см. рис. 1) помещался в камере, изготовленной из нержавеющей стали, снабженной окнами для фоторегистрации. Состояние проводника и разлет продуктов взрыва регистрировались фоторегистратором СФР-2М в режимах лупы времени и фоторегистрации в продольном и поперечном направлениях относительно проводника. Ток через проводник регистрировался с помощью поясов Роговского и активных шунтов. Напряжение измерялось емкостным делителем. Температура плазмы газового дугового разряда продуктов взрыва проводника оценивалась по эталонному источнику ЭВ-45 методом сравнения.

В экспериментах распылились образцы на основе d -переходных металлов W, Mo, а также композитные сплавы системы WC—Co и специальные сплавы Р-18, Р-9, «синдаст» сечением 0,2—2,5 мм² и длиной 40—120 мм. Износостойкие покрытия наносились на различные детали машин и механизмов и инструмент из углеродистых и легированных сталей. Некоторые из этих деталей, работающие в условиях циклического износа, представлены на рис. 2.

Нанесенные покрытия исследовались методами металлографии и рентгеноструктурного анализа. Шероховатость измерялась профилометром — профилографом завода «Калибр» (модель 201), микротвердость — на приборе ПМТ-3. Износостойкость оценивалась в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Распыляемый материал в исходном состоянии для используемого метода должен быть в виде проволоочки или стержня определенного сечения. Авторы работы [4] выбирают размеры проволоочки исходя из уравнений

$$S = k_1 C U f^{2/3}, \quad l = k_2 U f^{-2/3}, \quad (1)$$

где k_1 и k_2 — постоянные коэффициенты, учитывающие свойства распыляемого материала и свойства среды, в которой производится взрыв (давление, газовый состав); f — частота контура, кГц; C — емкость батареи,

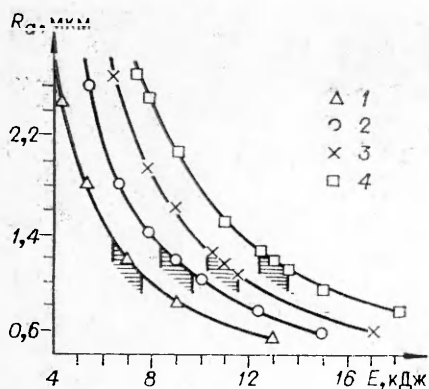


Рис. 3. Зависимость шероховатости от энергии накопителя.
1, 2 — ВК-20 (сплав системы WC—Co);
3, 4 — W; T (мкс): 1, 3 — 20, 2, 4 — 140.

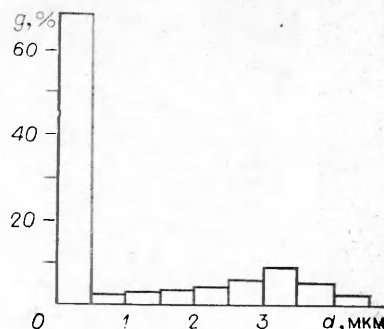


Рис. 4. Диаграмма распределения распыленных частиц сплава ВК-20 по размеру; $T=140$ мкс, $S=1,5$ мм², $l=60$ мм, $E_H=9,1$ кДж.

Φ ; U — напряжение батареи, В; S — сечение проволоочки, мм²; l — длина проволоочки, мм.

Как установлено данными исследованиями, коэффициенты k_1 и k_2 не могут быть определены однозначно для различных типов контуров, так как с изменением параметров S и l зарядное напряжение, зазоры и типы коммутаторов выбираются различными; кроме того, может меняться соотношение между количеством энергии, вкладываемой во взрыв проводника и в дуговую стадию разряда [7]. Иллюстрацией сказанного служит рис. 3, где штриховкой выделены области оптимальных свойств покрытий по адгезионной прочности и КПД использования взрываемого материала для двух различных RC-контуров. Из рис. 3 видно, что среднее значение шероховатости, определяемое по R_a , в области оптимальных свойств совпадает для различных контуров и составляет 1,0—1,4 мкм.

На рис. 4 приведено распределение капель металла по размерам при взрыве проволоки в воздухе (батарея I) для оптимальных условий. Мелкодисперсный материал, полученный в этих опытах, для условий, определяемых из формул (1), содержит сфероидные частицы размером от 0,5 до 4,5 мкм, а также мелкодисперсную золь. Массовая доля частиц с размером 0,5—4,5 мкм составляет 25—35%. КПД закрепления материала в пленочном покрытии для быстрой и медленной батареи также равен 25—28% для всех исследуемых материалов. Частицы размером менее 0,5 мкм практически не закрепляются на подложке в экспериментах, проведенных на воздухе при нормальном давлении. Вероятно, это связано с тем, что они рассеиваются фронтом отраженной ударной волны. Прочность закрепления конденсированной частицы зависит от напорного давления и времени действия напорного давления капли, которые для частиц малого размера весьма незначительны [2, 8]. Кроме того, на прочность сцепления покрытий с деталью значительное влияние оказывает тепловой режим нагрева подложки в момент конденсации.

Энергия, поглощенная проводником, рассчитывалась из осциллограмм тока и напряжения. Часть этой энергии, преобразующаяся в энергию ударной волны, определялась из фоторегистрограмм по скорости движения ударной волны, из них же определялась и кинетическая энергия продуктов взрыва проволоочки. Общая энергия излучения измерялась калориметрическим датчиком ИМО-2, а зависимость энергии от времени регистрировалась пироэлектрическим приемником [9]. Подогрев подложки током шунтирующего газового разряда определялся по методике работы [10], а подогрев излучением рассчитывался по температуре излучения и времени действия. В работе [7] показано, что в условиях

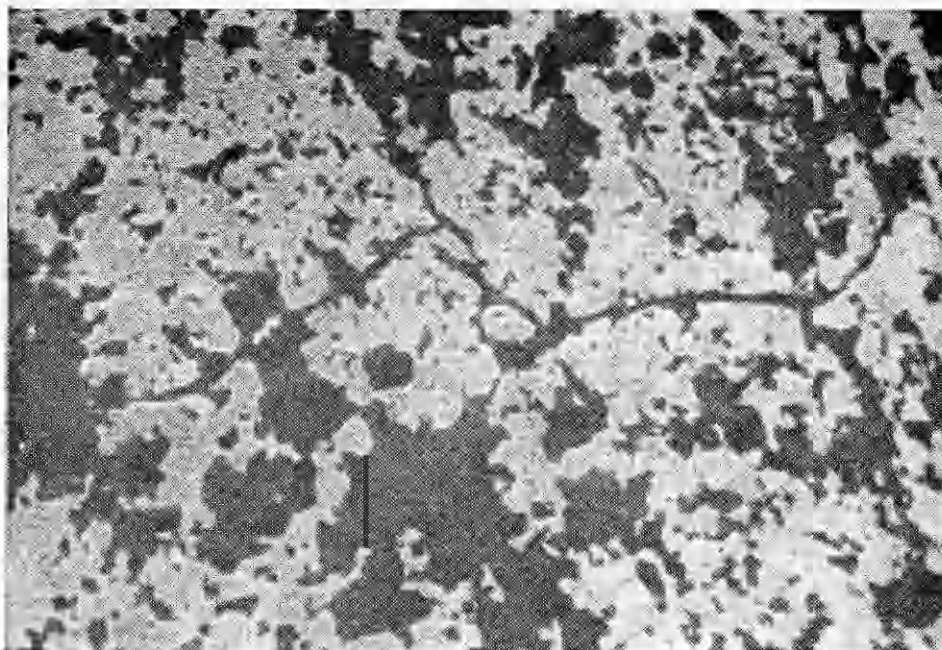


Рис. 5. Микротрещины на фронтальной поверхности покрытия из сплава ВК-20, нанесенного на углеродистую подложку (трехслойное покрытие).

данных экспериментов газовый разряд излучает как абсолютно черное тело.

Расчет с помощью указанных способов измерений для вольфрамового проводника при условиях (1) дал следующие величины: энергия на нагрев, распыление проволоочки и ударную волну составляет $\sim 20-25\%$, энергия излучения — $\sim 60-80\%$, до 20% начальной энергии, введенной в проводник, может быть затрачено на подогрев подложки излучением и током разряда (при близком расположении подложки и проводника). Если расстояние между проволоочкой и подложкой

$$R < 30r \quad (2)$$

(r — радиус проволоочки), то поверхность подложки становится шероховатой, деформируясь под действием ударной волны, энергии дугового разряда и поверхностного тока в подложке, протекающего вследствие шунтирования дуги подложкой [10]. В экспериментах установлено, что соотношение (2) справедливо для любого контура. Оптимально расстояние $R = 30 \div 40r$. Отклонение по толщине покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность втулок, не превышает 5% .

В настоящих экспериментах толщина покрытия однократного распыления при выполнении оптимальных условий (1), (2) находится в пределах $3-8$ мкм. Более толстые покрытия получались при повторных циклах распыления, но в этом случае при напылении более трех слоев на поверхности наблюдается образование сетки трещин из-за сложения сжимающих напряжений, образующихся в слоях (рис. 5). Наименьшее количество трещин образуется в условиях оптимума, в соответствии с соотношениями (1).

Металлографические исследования фронтальных и поперечных шлифов (рис. 6) на оптическом микроскопе с увеличением до 1000 раз показали, что при усилении факторов импульсного воздействия плазмы электрического взрыва проводников, а также тока, протекающего по подложке, под покрытием имеется зона теплового воздействия, в кото-

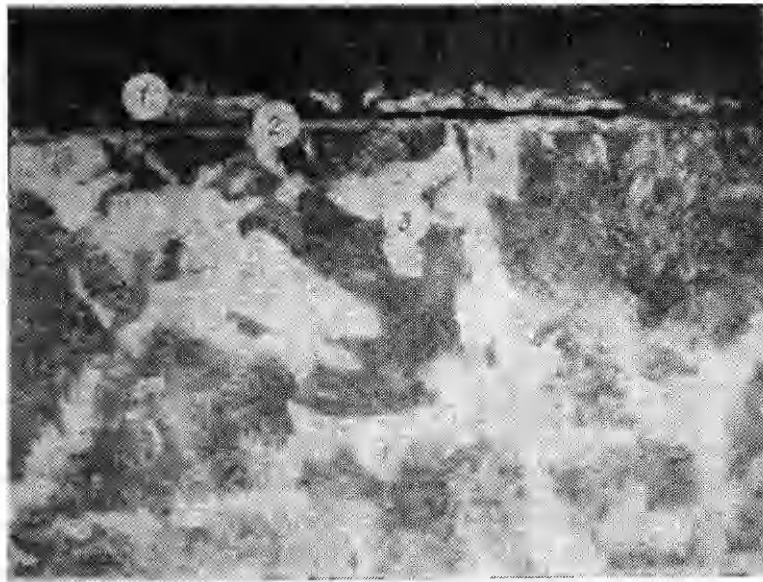


Рис. 6. Фотография микрошлифа поперечного сечения образца. Образец протравлен травителями, применяемыми для выявления структуры стали и кобальта.
1 — покрытие; 2 — зона теплового воздействия; 3 — подложка.

рой наблюдаются столбчатые структуры. В подложках из высокоуглеродистых сталей возрастает поверхностная твердость до $H_v = 750$. В районе внешней границы покрытия наблюдаются поры, а со стороны подложки пор нет. Рентгеноструктурный анализ покрытий, полученных при взрыве W и Mo, показал, что основными напряжениями являются сжимающие. Фазовым рентгеновским анализом конденсатов, полученных при электрическом взрыве системы WC—Co, обнаружены в основном β -фаза WC и небольшое количество W_2C . Отжиг покрытия в вакууме при 860°C приводит к исчезновению сетки трещин и восстановлению кубического вольфрама до исходного гексагонального.

Появление β -WC и метастабильных фаз обуславливает более высокую по сравнению с исходной микротвердость покрытия. Так, покрытие, образованное из распыленного сплава ВК-20, имеет микротвердость $1400\text{--}1500\text{ кг/мм}^2$ (исходная микротвердость образца 1100 кг/мм^2).

Большое значение при нанесении покрытий имеет форма профиля детали и ее размеры. Газодинамический фактор при величинах полостей, больших $30d$ (d — диаметр проводника), вносит существенные поправки в характер распределения покрытий по толщине. Поэтому целесообразно при нанесении покрытий располагать детали таким образом, чтобы была образована внутренняя полость, близкая к цилиндрической вдоль всей длины проводника. Это достигается либо соответствующей пространственной группировкой деталей, либо применением приспособлений, обеспечивающих данный принцип. С другой стороны, целесообразно разделять детали или группы деталей на цилиндрические группировки (вдоль оси проводника), изолированные друг от друга диэлектрическими вставками. Так, например, зуб батана (см. рис. 2) бесчелночного ткацкого станка при нанесении покрытий группировался в пакет из 20 штук, при этом все поверхности, кроме участков, на которые наносится покрытие, изолируются органическим компаундом. Таким образом, удается ограничить вредное влияние дуговой стадии разряда на рабочие поверхности детали. Смещая определенным образом проводник внутри полости из пакета деталей, можно добиться эффекта направленного взрыва, изолировав отражающую стенку, и тем самым увеличения толщины покрытия до 20 мкм за одно распыление.

Определение прочностных свойств покрытий, полученных рассматриваемым методом, связано с рядом особенностей и при применении любой из разработанных методик чревато большими погрешностями. Для качественной оценки при определении коэффициентов k_1 и k_2 целесообразно использовать методику измерения предельного напряжения сдвига покрытия [8]. На наш взгляд, наиболее оптимальным при определении свойств износостойкости покрытия является имитация износа детали или узла в условиях, приближенных к реальным. Это несколько увеличивает срок определения количественного показателя, но в то же время дает реальную основу для экономических расчетов по целесообразности применения данного метода. Повышение стойкости зуба батана, зарегистрированное по методике [11], показало повышение износостойкости детали в 4—5 раз по сравнению с цементованной и закаленной сталью Ст. 20. Стойкость мерительного инструмента при малых допусках на износ (до 5 мкм) увеличивается при нанесении твердосплавных покрытий в 5—10 раз в сравнении с закаленной сталью Ст. У8.

Длина распыляемого проводника обычно определяется из условия отсутствия электрического пробоя по образующимся парам металла $U = ml$. Коэффициент $m = 3 \div 15$ кВ/см зависит от типа проводника и параметров батареи [12].

Масса распыляемого проводника при выбранной длине зависит от сечения S , которое определяется величиной и формой импульса тока [13]:

$$S^2 = A \int_0^t I^2 dt.$$

Для каждого материала значение постоянной A находится экспериментально, например для меди $A = 5 \cdot 10^{-10}$ А²·с/см⁴. Для взрыва толстых проводников мощности обычно используемых конденсаторных батарей уже не хватает, тогда целесообразно переходить на другой источник питания, например, взрывной электрический генератор [14], от которого одновременно подрывалось 110 медных проводников диаметром 0,1 и длиной 300 мм.

Поступила в редакцию 26/XI 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. В. Самсонов, А. П. Эпик. Тугоплавкие покрытия. М.: Металлургия, 1973.
2. А. А. Шука, В. Г. Днепровский, А. Г. Дудолодов. Зарубежная электронная техника, № 24. ЦНИИЭлектроника, 1973.
3. А. Е. Войтенко, В. П. Исаков, Т. М. Соболенко. ТВТ, 1975, 13, 5.
4. Т. Сухара, С. Фукуда, Ито.— В сб.: Получение покрытий высокотемпературным ником, № 24. ЦНИИЭлектроника, 1973.
5. М. Х. Шоршоров, В. В. Кудинов, Ю. А. Харламов. Физика и химия обработки материалов, 1977, 5.
6. А. П. Александров. Кинетика образования и структуры твердых слоев. Новосибирск: Наука, 1972.
7. В. П. Исаков, В. С. Таран. Тез. II совещания по обработке материалов взрывом. Новосибирск, 1981.
8. Sahara, Tohiro et al. Nippon Tungsten Review, 1974, 7.
9. Ю. Н. Киселев, В. З. Крохин. ПМТФ, 1976, 4.
10. Б. М. Крейчман, В. С. Таран, В. И. Филимоненко. Тез. 3 Всесоюз. семинара по плазмохимии. М.: Наука, 1979.
11. Л. Н. Тушинский и др. Повышение эксплуатационной стойкости зуба батана. Заключительный отчет НИР. Новосибирск, 1979, ВИНТИ за № 770050248.
12. Ю. А. Котов, Н. Г. Колганов, В. С. Седой.— В сб.: Мощные наносекундные источники ускоренных электронов/Под ред. Г. А. Месяц. Новосибирск: Наука, 1973.
13. Г. Кнопфель. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
14. Е. И. Азаркевич, А. Е. Войтенко и др. ЖТФ, 1976, 46, 9.