

УДК 621.791.76:621.7.044.2
DOI: 10.7868/S25000640220408

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ

© 2022 г. Академик В.И. Лысак¹, чл.-корр. РАН С.В. Кузьмин¹

Аннотация. Рассмотрены вопросы практического применения энергии взрыва в мирных целях, в частности для создания новых металлических, металлокерамических и металлополимерных и ряда других материалов, для придания материалам новых эксплуатационных свойств, приведены различные схемы взрывного нагружения, приведены некоторые закономерности физики взрыва и теории высокоскоростного соударения тел. В целом ряде случаев энергия взрыва является безальтернативным способом получения материалов с уникальными свойствами. Приведены известные из истории примеры первого применения взрыва в военных целях при осаде Белграда и штурме Казани, самого мощного в мировой строительной практике взрыва, перекрывшего 80-метровой плотиной р. Малую Алматинку в 1966–1967 гг., первых попыток применения взрыва в мирных целях при чеканке железных пластин с помощью взрыва путем перенесения отпечатка с трафарета, при соединении труб при производстве велосипедов в Великобритании путем внутренней раздачи с помощью воды, нагружаемой взрывом небольших зарядов взрывчатых веществ, при формообразовании цилиндрических металлических деталей в матрице взрывом. Рассмотрены некоторые аспекты и примеры практического использования взрыва при упрочнении металлов, штамповке, сварке и резке, обработке сварных соединений, компактировании порошковых материалов и нанесении композиционных порошковых покрытий на поверхности монолитных металлических заготовок, активации полимерных порошковых материалов, синтезе детонационных алмазов, для повышения урожайности некоторых видов растений при воздействии слабых ударных волн на их семена, а также в ряде других технологических процессов.

Ключевые слова: энергия взрыва, упрочнение металлов, ударная волна, высокоскоростное соударение.

APPLICATION OF EXPLOSION ENERGY FOR CREATION AND PROCESSING OF MATERIALS AND STRUCTURES

Academician RAS V.I. Lysak¹, Corresponding Member RAS S.V. Kuzmin¹

Abstract. The article deals with the practical application of explosion energy for peaceful purposes for the creation of new metal, metal-ceramic and metal-polymer and many other materials, for imparting new operational properties to materials; various explosive loading schemes are given, some questions of explosion physics and theory of high-speed collision of bodies are observed. It was demonstrated that in some cases the energy of an explosion is the only way to obtain materials with unique properties. The article touches upon examples known from history of the first use of an explosion for military purposes during the siege and assault of the cities of Belgrade and Kazan, respectively; the most powerful explosion in world construction practice, which blocked the Malaya Almatinka River with an 80-meter dam in 1966–1967; the first attempts to use an explosion in civilian purposes in embossing iron plates by transferring an imprint from a stencil; in joining pipes in the manufacture of bicycles in the UK by internal expansion with water loaded with an explosion of small explosive charges; in the shaping of cylindrical metal parts in a matrix by an explosion. Some aspects and examples of the practical use of explosion in metals hardening, stamping, welding and cutting, processing welded joints, compacting powder materials and applying composite powder coatings

¹ Волгоградский государственный технический университет (Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation), Российская Федерация, 400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: weld@vstu.ru

on the surface of monolithic metal blanks, activating polymer powder materials, synthesizing detonation diamonds, and increasing the yield of certain plant species when exposed to weak shock waves on their seeds, as well as in a few other technological processes are considered.

Keywords: explosive energy, hardening of metals, shock wave, high-speed impact.

ВВЕДЕНИЕ

По мере развития человечества постоянно происходил процесс замещения ручного труда работой механизмов и машин, требующих для своего функционирования все больших и больших энергий. Как показало время, в огромном количестве случаев более эффективным оказалось применение взрыва, практическое использование энергии которого первоначально ограничивалось всего лишь задачами разрушения. Первая известная практическая апробация энергии взрыва относится к подземным подрывам пороховых зарядов во времена осады Белграда османскими войсками султана Мехмеда II в 1456 г. [1]. В России порох стал известен с 1382 г., а первые мощные подземные заряды были использованы Иваном Грозным при штурме Казани в 1552 г. [2].

Позднее также для целей разрушения взрывчатые вещества (ВВ) применялись при добыче полезных ископаемых, строительных работах, тушении пожаров и в военном деле. Наиболее показательным примером был самый мощный в мировой строительной практике взрыв, перекрывший 80-метровой плотиной р. Малую Алматинку в 1966–1967 гг. Всего при этом было использовано 9500 тонн ВВ и перемещено около 3 млн м³ горных пород [3].

Принципиально новым и во многом революционным подходом в использовании энергии взрыва стало перенаправление вектора его действия с целей разрушения на задачи созидания.

Одним из первых, кто использовал взрыв в металлообработке, был Чарльз Эдвард Манро, который в конце XIX века нашел способ направлять энергию взрыва в нужное место в нужном количестве [4]. В 1888 г. он описал метод чеканки железных пластин с помощью взрыва путем перенесения отпечатка с трафарета, помещенного между заготовкой и зарядом ВВ.

Однако по-настоящему новая глава в истории развития взрывных технологий была открыта в 1897 г. выдачей первого патента [5], описывающего технологию соединения (не разрушения!) труб при производстве велосипедов в Великобритании

путем внутренней раздачи с помощью воды, нагружаемой взрывом небольших зарядов ВВ. А в 1909 г. в США был оформлен патент [6] на формообразование цилиндрических металлических деталей в матрице взрывом.

Так было положено начало взрыву созидающему. Сегодня известно много технологических приложений по использованию энергии взрыва для создания новых материалов, их упрочнения, синтеза, соединения, формообразования, активации и многого другого. Рассмотрим наиболее эффективные из них.

УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Одним из первых и успешных приложений по созидающему использованию энергии взрыва в XX веке явилась попытка его использования для упрочнения металлов. В период 1923–1926 гг. группой американских ученых были проведены первые исследования воздействия взрыва на низкоуглеродистые стали [7; 8].

Прохождение ударных волн в твердых телах сопровождается многими явлениями, имеющими большое научное и практическое значение. Ударные волны упрочняют материалы, в них протекают полиморфные и фазовые превращения, процессы

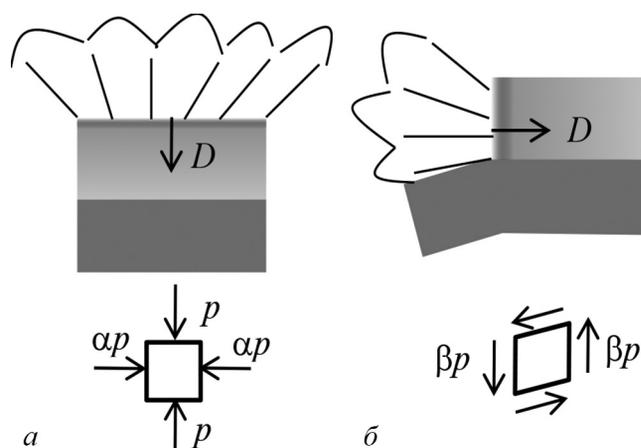


Рис. 1. Принципиальные схемы упрочнения металлов: *a* – плоской ударной волной; *б* – скользящей волной [7].
Fig. 1. Schematic diagrams of hardening of metals: *a* – plane shock wave; *б* – sliding wave [7].

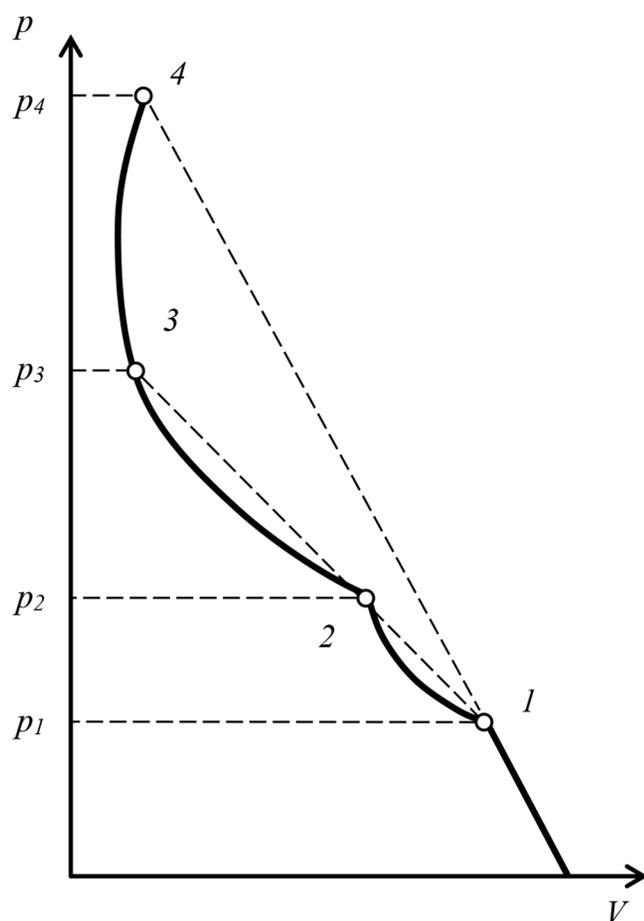


Рис. 2. Характерные точки ударной адиабаты Гюгонио [10].
Fig. 2. Characteristic points of the Hugoniot shock adiabat [10].

разложения и синтеза, дефектообразования и совершенствования структуры.

Поведение вещества при обжати мощной ударной волной существенно зависит от схемы его нагружения и носит противоречивый характер: оно может потерять свою твердость и вести себя как жидкость либо, наоборот, приобрести твердость, если ее изначально не было.

Использование схемы *a* (рис. 1) с плоской ударной волной, перпендикулярно воздействующей на поверхность вещества, приводит к реализации напряженного состояния трехосного сжатия. В другом случае (рис. 1б) скользящая по поверхности нагрузка вызывает сдвиговую деформацию материала. Высокий уровень касательных напряжений, значительно превышающий сопротивление пластической деформации, неминуемо инициирует процесс релаксации их во время нагружения. Сжатый твердый металл переходит в состояние текучести, сопровождающееся бурным образованием (иногда аннигиляцией) дефектов кристаллической решетки

– линейных (дислокаций) и точечных. Нормальные напряжения при этом сохраняются почти до конца ударного импульса на уровне приложенного давления. В итоге после завершения процесса релаксации отношение величины касательных напряжений к действующим нормальным стремится к нулю, что является характерным для жидкости, а это значит, что твердое тело, находящееся под высоким ударным давлением, приобретает некоторые принципиальные свойства жидкости.

Смит [9] предложил оригинальный механизм размножения дислокаций при действии высокого давления, основанный на существовании «дислокационной поверхности», образующейся на фронте ударной волны и представляющей собой систему наклонных краевых дислокаций. Эта поверхность перемещается вместе с фронтом ударной волны путем диагональных сдвигов двух систем краевых дислокаций.

При рассмотрении особенностей, имеющих место при обработке металлов ударными волнами, особый интерес представляют структурные изменения, определяющие свойства деформированного материала.

Поведение материала при воздействии ударной волны обычно рассматривают с помощью адиабаты Гюгонио. Так, при повышении давления до величины p_1 (рис. 2) в материале, состояние которого характеризуется точкой 1, появляется, кроме упругой волны, движущейся с околосвуковой скоростью, пластическая волна. В интервале состояний материала между точками 1 и 2 движутся две ударные волны: впереди упругая, давление на фронте которой близко к пределу прочности материала, а за ней – пластическая волна.

При достижении давления p_2 материал из одного кристаллического состояния переходит в другое, что характеризуется изломом кривой в точке 2. В интервале давлений между p_2 и p_3 пластическая волна в материале разделяется на две пластические волны с разными амплитудой и скоростью движения [10]. Таким образом, в этом интервале давлений по материалу движется впереди упругая волна, а сзади система двух пластических волн. Если давление ударной волны достигнет величины, равной p_3 , то в точке 3 произойдет слияние пластических волн, что выразится незначительным изломом адиабаты. Точка 4 кривой сжимаемости характеризует состояние материала при давлении p_4 , при достижении которого скорости упругой и пластиче-

ской волн уравниваются и по материалу движется одна упругопластическая волна.

Наибольшее число исследований по статической и динамической сжимаемости и изучению фазовых переходов выполнено на железе. Установлено [11], что кривая Гюгонио для железа испытывает излом при давлении 13 ГПа (рис. 3), что объясняется фазовым переходом от объемноцентрированной кубической решетки α -фазы к γ -фазе, имеющей плотноупакованную гранецентрированную кубическую решетку. Фазовый переход сопровождается резким увеличением твердости железа, особенно в сравнении с металлом, не испытывающим в этом интервале давлений полиморфных превращений.

На критическое давление, при котором наблюдается фазовое превращение, влияет температура и состав исходного материала. Исследованиями температурной зависимости фазового превращения в железе под действием ударного нагружения в диапазоне от 78 до 1158 °С [12] установлено, что давление, при котором происходит фазовый переход в железе, с повышением температуры снижается (рис. 3). Кроме того, структура железа при температурах выше 500 °С резко отличается от структуры при более низких температурах. Излом ударной адиабаты при 500 °С и давлении 11,5 ГПа разделяет области существования железа в различных модификациях. Кроме α -фазы и высокотемпературной γ -фазы существует ϵ -фаза, обладающая гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой.

Сегодня энергия взрыва достаточно широко используется для поверхностного и объемного упрочнения зубьев ковшей экскаваторов, деталей камнедробилок, фрез врубных горных машин, стрелок и крестовин на железнодорожном транспорте. Износ деталей при этом сокращается на 40–50 %, а срок службы повышается на 30 %.

ШТАМПОВКА ВЗРЫВОМ

Одним из наиболее перспективных процессов обработки взрывом является листовая штамповка. Ее активному промышленному использованию способствовало развитие в 1960-х гг. космической отрасли, требующей применения большой номенклатуры крупногабаритных изделий, изготавливаемых из листа небольшими партиями. В 1961 г. Д. Коул [13], а в 1962 г. В. Дрекслиус [14] получили патенты США на способы штамповки взрывом.

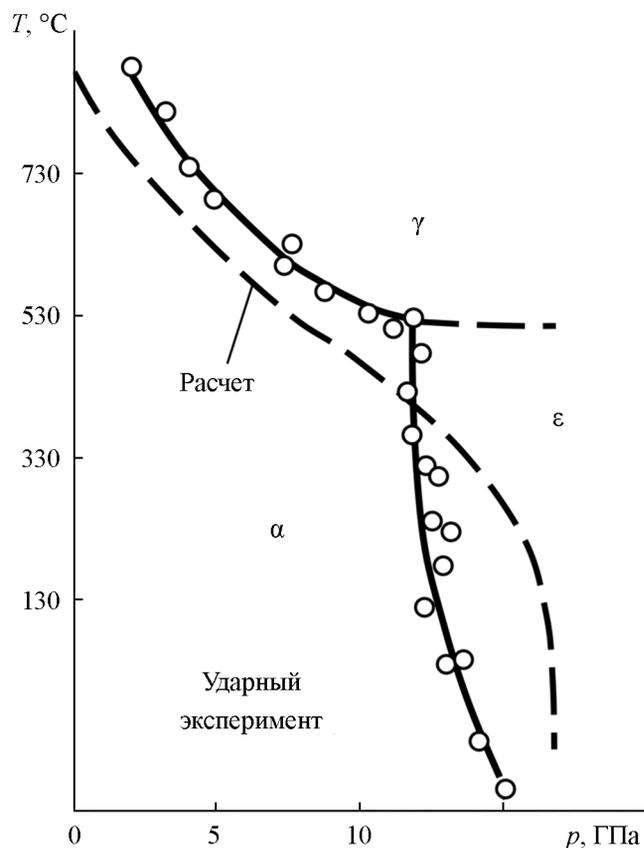


Рис. 3. Фазовая диаграмма состояния железа [11].
Fig. 3. Phase diagram of the state of iron [11].

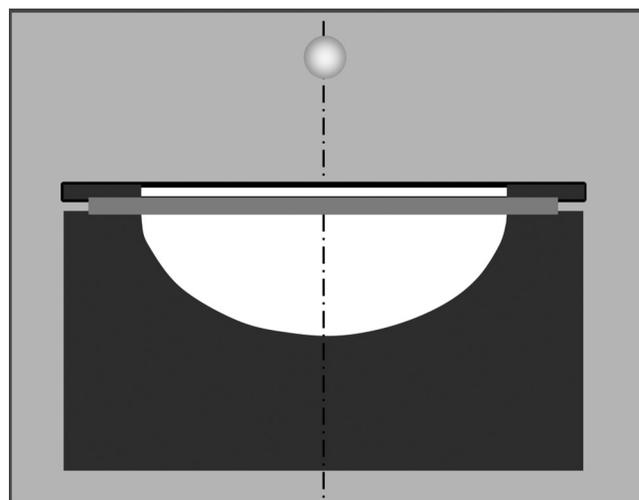


Рис. 4. Принципиальная схема штамповки взрывом [13].
Fig. 4. Schematic diagram of explosion stamping [13].

Процесс листовой штамповки (рис. 4) осуществляется путем расположения между заготовкой и зарядом ВВ передаточной среды (обычно воды). При взрыве заряда ВВ высвобождающаяся энергия передается окружающей среде, часть которой

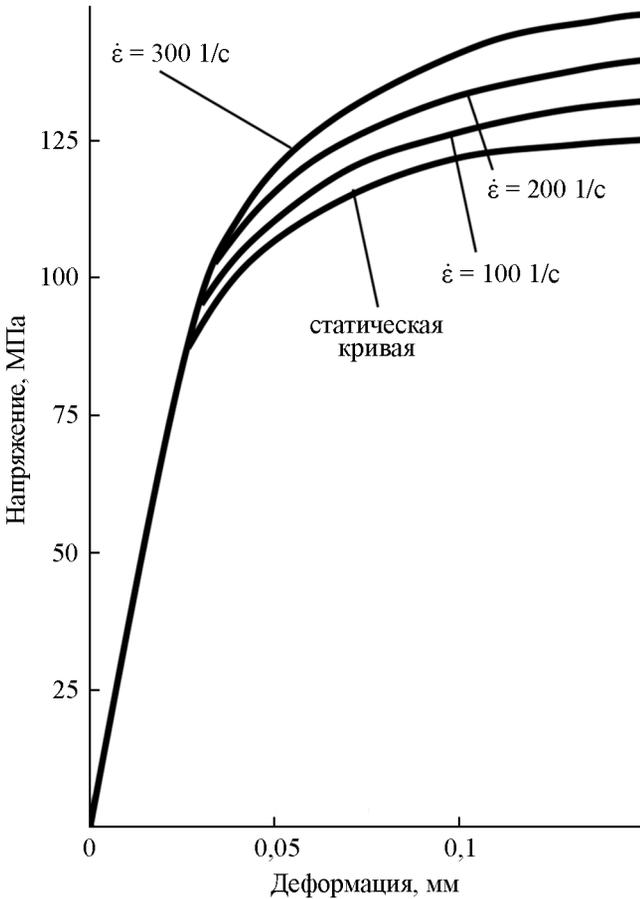


Рис. 5. Статические и динамические кривые напряжение – деформация [15].
Fig. 5. Static and dynamic stress-strain curves [15].

затрачивается на деформирование заготовки. Перемещение металла заготовки при этом происходит со скоростями 200–300 м/с, что требует предварительного вакуумирования полости матрицы. Данным способом удастся штамповать толстостенные крупногабаритные заготовки из труднодеформируемых металлов [15; 16].

В статическом диапазоне деформирования тепло рассеивается достаточно быстро. При увеличении скорости условия деформирования приближаются к адиабатическим, когда выделяющееся тепло не рассеивается за время формообразования. При увеличении скоростей деформации до 100 с⁻¹ наблюдается рост сопротивления текучести, то есть динамические кривые напряжения – деформация (рис. 5) проходят выше статических:

$$\sigma = B \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^m,$$

где m – показатель чувствительности к скорости деформации.

Ограничением процесса является критическая (предельная) скорость формообразования, при превышении которой наблюдается резкое снижение пластичности. Общая работа формообразования складывается из работ изгиба $E_{изг}$ и растяжения – сжатия E_{p-c} :

$$E_{изг} = \pi R_0 \sigma_0 \delta_0^2 \left[\bar{y}_0 + \frac{R_0}{4 \left(R_r + \frac{\delta_0}{2} \right)} \bar{y}_0^2 \right];$$

$$E_{p-c} = 0,8\pi \sigma_0 R_0^2 \bar{y}_0^2,$$

где R_0 – радиус смачиваемой поверхности заготовки; R_r – радиус галтели; \bar{y}_0 – относительный прогиб детали; σ_0 – среднее значение интенсивности напряжений; δ_0 – толщина детали.

На рисунке 6 приведены границы трех характерных областей. Область I определяет такие величины весов заряда G и начальных коэффициентов вытяжки K_0 , при которых можно получить лишь неполную вытяжку. Область II соответствует соотношениям между весом заряда и диаметром заготовки, при которых происходит полная вытяжка заготовки. А в области III при любом коэффициенте вытяжки K_0 заготовка разрушается.

Точка А, общая для всех областей, соответствует предельному коэффициенту вытяжки K_0 , при котором обеспечивается наибольшая вытяжка за одну операцию.

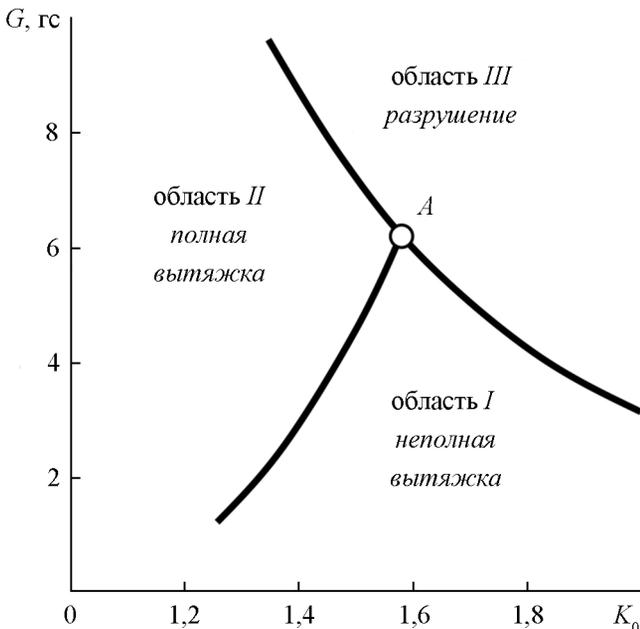


Рис. 6. Области вытяжки для стали 1X18Н9Т [16].
Fig. 6. Drawing areas for steel S32100 [16].

Таблица 1. Величины предельных коэффициентов вытяжки
Table 1. Limit lengthening coefficients

Материал Material	OT-4 Ti Grade 9	Ст3 A570-35	2Х13 S42000	X18Н10Т S32100	08кп A619	АМг6М A95456
K_0	1,48	1,55	1,56	1,58	1,59	1,64

Таким образом, кривые штампуемости позволяют выявить предельные соотношения между весом заряда и начальным коэффициентом вытяжки заготовки, а также определить величину предельного коэффициента вытяжки. Значение этого коэффициента может быть использовано для сравнения деформационных способностей различных материалов при гидровзрывной вытяжке.

Для некоторых материалов были получены величины предельных коэффициентов вытяжки, показанные в таблице 1 [16].

Наибольший вклад в развитие этого процесса внесли ученые Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского (г. Харьков) и др.

СВАРКА ВЗРЫВОМ

Одним из самых эффективных приложений взрыва в мирных целях, а в ряде случаев единственно возможным инструментом создания высококачественных слоистых композиционных материалов является сварка взрывом. Кстати, это один из российских научных приоритетов, рожденных в 1961 г. в научной школе академика М.А. Лаврентьева [17] и продолженных в стенах Волгоградского государственного технического университета профессорами В.С. Седых и П.О. Пашковым. Внешне он очень прост, а по своей физической сущности очень сложен и затрагивает многие фундаментальные понятия наук о материалах.

При сварке взрывом образование соединения происходит в результате деформационного воздействия на соединяемые материалы, которое характеризуется высокой скоростью их соударения при малой длительности контактного взаимодействия ($\sim 10^{-6}$ с). Процессы диффузии за такое короткое время не успевают произойти. Поэтому этот способ нашел широкое применение при производстве металлических слоистых композиционных материалов из разнородных материалов, соединить которые традиционными методами сварки затруднительно

либо невозможно. Полученные сваркой взрывом композиционные материалы обладают высокой прочностью соединения слоев и эффективно применяются в различных отраслях промышленности.

Принципиальная схема сварки взрывом показана на рисунке 7 [18]. Металлические пластины располагаются параллельно друг над другом с некоторым зазором. На поверхности метаемой пластины помещают заряд взрывчатого вещества, который инициируют детонатором. Фронт детонации распространяется по заряду со скоростью D . Под действием высокого давления расширяющихся продуктов детонации метаемая пластина разгоняется до скорости V_c порядка нескольких сотен метров в секунду и соударяется с неподвижной под некоторым углом γ , вершина которого (линия или точка контакта) перемещается вдоль неподвижной

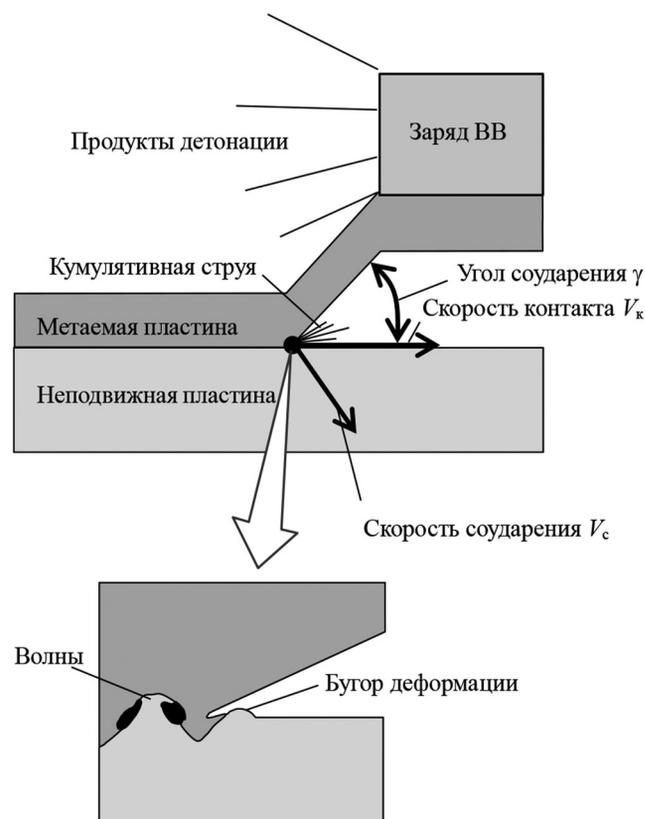


Рис. 7. Принципиальная схема сварки взрывом [18].
Fig. 7. Schematic diagram of explosive welding [18].

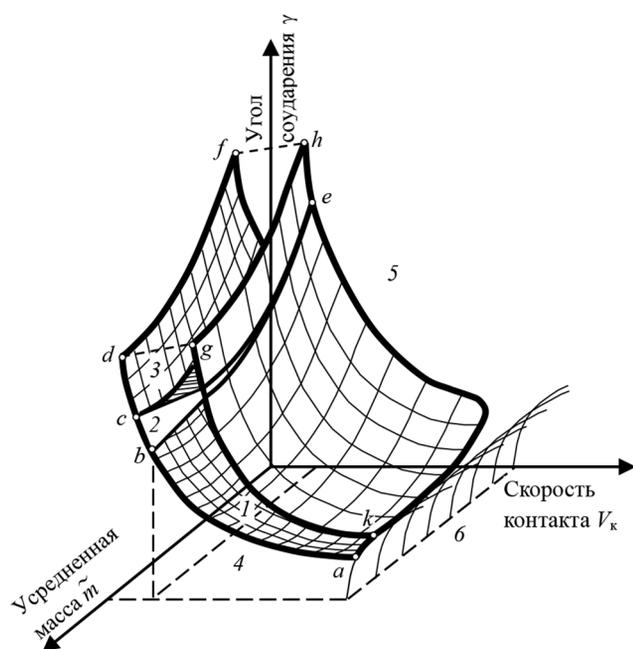


Рис. 8. Положение основных характерных областей сварки металлов взрывом [19]: 1 – «традиционных режимов»; 2 – безволновых режимов; 3 – аномального волнообразования; 4 – докритических режимов; 5 – развитой кумуляции; 6 – сверхзвуковых режимов.

Fig. 8. The position of the main characteristic areas of metal explosive welding [19]: 1 – “traditional modes”; 2 – waveless modes; 3 – anomalous wave formation; 4 – subcritical regimes; 5 – developed cumulation; 6 – supersonic modes.

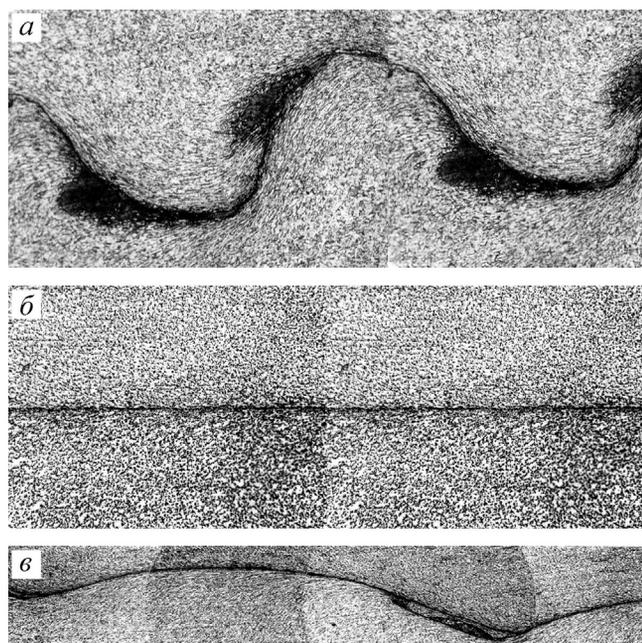


Рис. 9. Типичные структуры зон сварного соединения из различных характерных областей пространства параметров (см. рис. 8) [20]: а – область 1; б – область 2; в – область 3.

Fig. 9. Typical structures of zones of a welded joint from various characteristic regions of the parameter space (see Fig. 8) [20]: а – area 1; б – area 2; в – area 3.

пластины со скоростью контакта V_k в направлении распространения детонации. В окрестностях линии контакта создаются условия, необходимые для образования соединения металлов. Перед точкой контакта образуется кумулятивная струя, которая способствует самоочищению поверхностей пластин, металл интенсивно деформируется, образуется бугор деформации, который движется с большой скоростью к поверхности противоположной пластины и выдавливает из нее очередной бугор. Это приводит в некоторых случаях к образованию в соединении волн. За точкой контакта деформационные процессы некоторое время продолжают, что ведет к увеличению объема пластически деформированного металла, а также к увеличению размеров волн, если они образовались [19].

Такое соударение тел сопровождается рядом замечательных эффектов: явлениями волнообразования, кумуляции и, наконец, схватывания тел. В зоне соударения протекают интенсивные узлолокализованные пластические деформации, обычно в виде волнообразования. При этом в околошовной зоне (ОШЗ) уровень пластического течения металла достигает тысяч процентов. Высокие давление и скорости процесса кардинально изменяют обычные и привычные свойства металлов, которые в этих условиях уподобляются в узкой ОШЗ вязкопластической жидкости. Соединение происходит без расплавления металла, диффузионных процессов, а получаемые сварные соединения отличаются исключительно высокой прочностью даже при сварке «несовместимых» металлов.

За счет высокоскоростного косоугольного соударения поверхностей металлических пластин создаются условия, необходимые для их твердофазного взаимодействия и схватывания (сварки). Реализуемая в окрестностях угла соударения интенсивная пластическая деформация материалов приводит к образованию физического контакта и активации контактных поверхностей, и в результате двухстадийной топомической реакции происходит схватывание (сварка) с образованием прочного соединения. Плотность дислокаций в контакте металл – металл достигает 10^{10} – 10^{12} см⁻².

Важнейшим научным результатом стало установление качественных и количественных взаимосвязей между основными параметрами исследуемого процесса и свойствами получаемых соединений, что позволило определить и описать все основные границы существования данного процесса в энер-

гетических координатах «усредненная масса свариваемых слоев \bar{m} – относительная скорость точки контакта V_k – динамический угол соударения γ » в виде пространства параметров, в котором возможно получение сварных соединений и которое схематически представлено на рисунке 8 замкнутой фигурой, рассеченной в передней части плоскостью, перпендикулярной оси \bar{m} и ограниченной сверху и снизу двумя поверхностями, adf (нижняя граница) и kgk (верхняя граница) [19]. Между ними расположены три характерные области, отличающиеся феноменологией пластического течения и соответствующим ей профилем остаточных деформаций металла в околошовной зоне [20].

Получаемые в области традиционных режимов сварки (рис. 8, область 1) соединения металлов с близкими механическими свойствами отличаются высокой прочностью и синусоидальным профилем линии раздела (рис. 9а). В области 2 (рис. 8) условия пластического течения неблагоприятны для развития волнообразования вследствие равенства угла соударения и угла между вектором скорости бугра деформации и поверхностью пластин, что вызывает получение прямолинейной границы раздела при высокой прочности соединения слоев (рис. 9б). Сварные соединения с аномальными волнами (рис. 9в), существующими в области 3, также имеют высокие прочностные свойства, но такие соединения не находят практического применения.

Физико-химические особенности процессов, протекающих при сварке взрывом, открыли уникальную возможность получения широкого круга композиционных материалов из практически любых разнородных металлов и сплавов с прочностью соединения слоев композита на уровне свойств основных металлов [18; 21; 22].

СВАРКА ВЗРЫВОМ С ОДНОВРЕМЕННОЙ ШТАМПОВКОЙ

При сварке взрывом часть энергии бесполезно расходуется на кинетическую энергию движения сваренного пакета, которая к тому же приводит к нежелательной макродеформации заготовок. Избыточную энергию можно использовать, например, для штамповки, совместив эту операцию со сваркой, что позволяет исключить применение дорогостоящего прессо-штампового оборудования и повысить производительность труда.

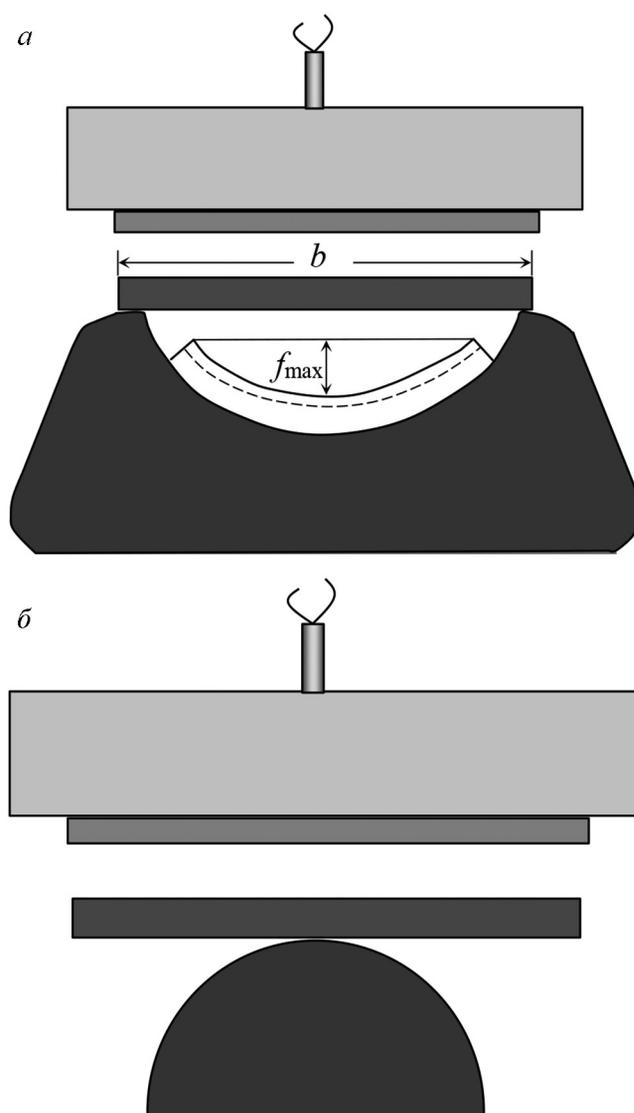


Рис. 10. Основные схемы сварки взрывом с одновременной штамповкой цилиндрических изделий [23]: а – в матрице; б – по оправке.

Fig. 10. Basic schemes of explosive welding with simultaneous stamping of cylindrical products [23]: а – in the matrix; б – on the mandrel.

Базовые схемы сварки взрывом с одновременной штамповкой (СВШ) биметаллических изделий цилиндрической формы представлены на рисунке 10. К достоинствам этих схем следует отнести простоту сборки и обеспечение свободного выхода воздуха между пакетом и металлической матрицей без применения специальных мер, используемых в известных схемах взрывной штамповки [23; 24].

Анализ баланса энергии процесса СВШ (рис. 11) показывает, что энергия заряда ВВ $W_{вв}$ в основном расходуется на кинетическую энергию метаемой пластины W_k и остаточную энергию продуктов де-

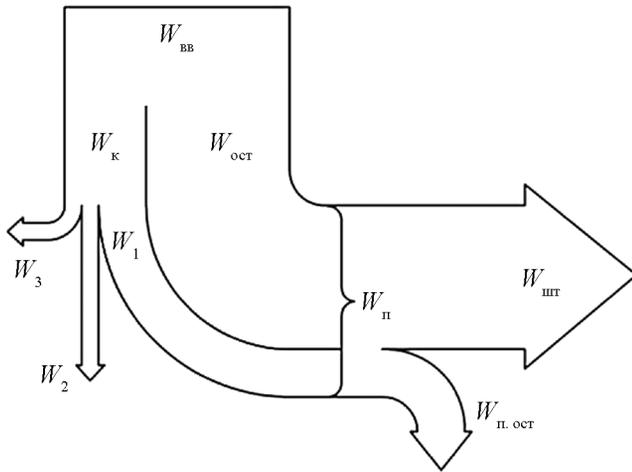


Рис. 11. Энергетический баланс сварки взрывом с одновременной штамповкой [24].

Fig. 11. Energy balance of explosive welding with simultaneous stamping EWS [24].

тонации $W_{ост}$, не используемую при сварке взрывом. Из трех составляющих кинетической энергии W_K для последующей штамповки может быть использована только кинетическая энергия движения сваренного пакета W_1 . Эта энергия вместе с $W_{ост}$ и составляет ту максимально возможную энергию движения сваренного пакета $W_{п.макс}$, которая расходуется на деформирование пакета (штамповку $W_{штт}$ биметаллической заготовки), а оставшаяся ее часть $W_{п.ост}$ передается металлической матрице.

На основе калориметрирования сваренных и отштампованных взрывом образцов получена зависимость для энергии штамповки $W_{штт}$:

$$W_{штт} = K_{шт} \frac{\delta_{п}^2 f_{max}}{b a}.$$

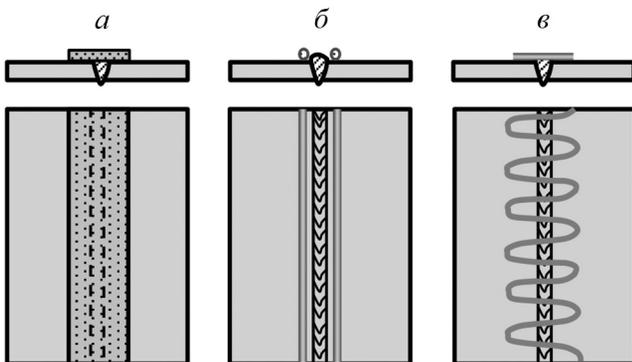


Рис. 12. Основные схемы взрывной обработки стыковых сварных соединений [27]: а – полосовым зарядом; б – шнуровым зарядом; в – «змейкой».

Fig. 12. Basic schemes of explosive treatment of butt welded joints [27]: а – strip charge; б – cord charge; в – “snake”.

Экспериментально установлено, что энергия штамповки $W_{штт}$ пропорциональна коэффициенту штамповки $K_{шт}$ (зависящему от материала заготовки), квадрату толщины пакета $\delta_{п}$ и обратно пропорциональна ширине пакета b , причем с увеличением коэффициента формы детали f_{max}/a энергия штамповки также существенно возрастает. Исследование влияния максимальной кинетической энергии сваренного пакета $W_{п.макс}$ на формирование заготовки показало, что относительный прогиб f_{max}/b и радиальная деформация ϵ_r линейно возрастают.

На практике СВШ применяется при изготовлении вкладышей подшипников скольжения, бронзо-стальных накладок бурового оборудования, медно-алюминиевых токоподводящих колодок.

ОБРАБОТКА ВЗРЫВОМ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Все способы сварки сопровождаются образованием в шве и ОШЗ различных видов неоднородности остаточных напряжений, степень развития которых в значительной мере определяет работоспособность конструкции в целом. Существует достаточно много способов снижения или целенаправленного перераспределения таких напряжений, а также повышения прочности сварных соединений. Большие возможности здесь открывает использование энергии взрыва.

Первая работа, посвященная исследованию возможности применения взрыва для повышения усталостной прочности сварных соединений, была выполнена в Институте электросварки им. Е.О. Патона (г. Киев) П.П. Михеевым, В.И. Труфяковым и Ю.П. Буштедтом в 1967 г. [25]. Ими было показано, что создание полей остаточных напряжений сжатия в местах геометрических концентраторов напряжений способствуют повышению усталостной прочности сварных соединений. По числу циклов долговечность соединений увеличивалась в 3–5 раз. Пределы выносливости при симметричном цикле напряжений повысились на 75–120 %. Для обработки обычно использовали детонирующий шнур или пластиковые ВВ.

Еще больший эффект достигается многократной обработкой сварных образцов, чередующейся с усталостными испытаниями, в результате чего суммарная долговечность увеличивается в 2 раза по сравнению с однократно упрочненными образцами и в 5 раз по сравнению с образцами в исходном состоянии [26].

Однако наиболее результативным оказалось применение энергии взрыва для снятия (снижения) остаточных напряжений в сварных швах. Принципиальная схема процесса показана на рисунке 12 [27].

Понятно, что с точки зрения достижения наибольшего эффекта обработки при минимальной величине зарядов ВВ предпочтительно подвергать нагружению зону действия остаточных напряжений растяжения. В листовых и им подобных сварных металлоконструкциях эта зона (шов и зона термического влияния (ЗТВ)) обычно имеет значительную протяженность и относительно малую ширину, что предопределяет использование для ее обработки удлиненных зарядов ВВ. Они могут представлять собой заряды в виде либо полосы, либо определенной комбинации детонирующих шнуров, охватывающих зону действия остаточных напряжений растяжения. Детонация зарядов такой геометрии осуществляется в скользящем режиме, в результате чего реализуется трехмерная конфигурация течения металла, для которой характерно существенно негидростатическое напряженное состояние.

Исследованиями В.Г. Петушкова с соавторами установлено, что после взрывной обработки плоских пластин усредненные по их толщине остаточные напряжения снизились до 80–85 % от исходной величины [27], а использование схемы «змейка» привело даже к изменению знака напряжений.

Степень снижения напряжений в зоне, где они максимальны, оценивают по формуле [27]:

$$\Delta\sigma_{x_1} = m \frac{Q_0}{p} \sigma_T \delta,$$

где m – погонная масса ВВ; Q_0 – удельная теплота взрыва; σ_T – предел текучести металла; δ – толщина металла.

Коэффициент p , имеющий размерность, обратную энергии, характеризует расход энергии на единицу сниженных остаточных напряжений.

Данная технология эффективно используется для улучшения служебных свойств крупногабаритных сварных конструкций химической и электротехнической промышленности.

КОМПАКТИРОВАНИЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЗРЫВОМ

Определенные успехи достигнуты в использовании энергии взрыва для компактирования дисперс-

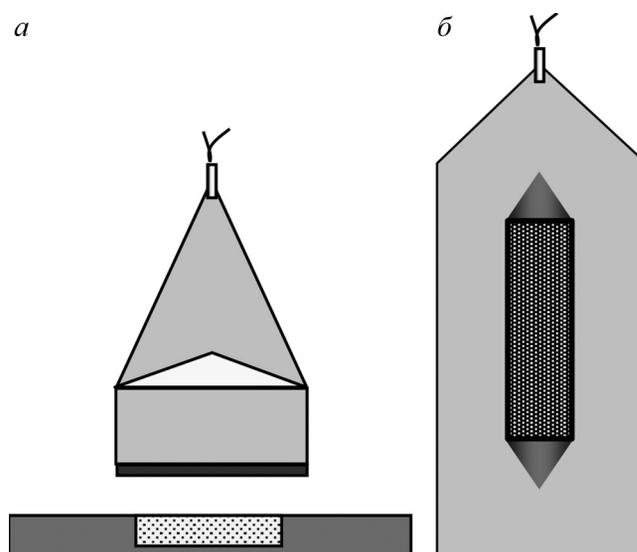


Рис. 13. Схемы компактирования порошковых материалов плоской (а) и скользящей (б) детонационной волной [28].

Fig.13. Schemes of compaction of powder materials by plane (a) and sliding (b) detonation wave [28].

ных материалов. Для реализации этой цели находят применение самые разные схемы нагружения [28]. Условно их можно разделить на:

- 1) схемы плоского нагружения (рис. 13а);
- 2) ампульные схемы со скользящим нагружением (рис. 13б).

В схемах с плоским нагружением для передачи давления от продуктов детонации к обрабатываемому материалу чаще всего используют какую-либо передающую среду (песок, воду и т.п.), применение которой позволяет добиться достаточно плавного нагружения, а главное, плавной разгрузки прессовки, обеспечивающей ее сохранение от образования откольных трещин и других видов разрушения.

При использовании ампульных схем хорошие результаты дает предварительное вакуумирование порошка и герметизация ампулы, предотвращающие дефекты, связанные с затрудненным удалением воздуха, вытесняемого из обрабатываемого материала при движении по нему ударной волны.

Высокий уровень давлений p , реализуемых в процессе обработки, позволяет достигать максимальной плотности прессовки ρ , близкой к плотности монолита ρ_0 , причем за счет кратковременности процесса диффузия между компонентами смеси не происходит.

Для описания связи плотности прессовки с давлением можно в первом приближении использовать известное уравнение Бальшина [29]:

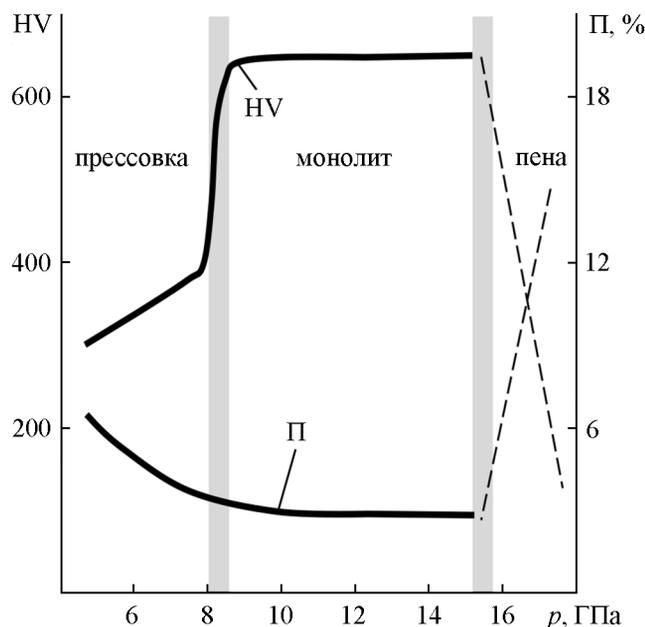


Рис. 14. Граничные условия прессования смеси порошков $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Ti}$ [28].

Fig. 14. Boundary conditions for pressing a mixture of $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{Ti}$ [28].

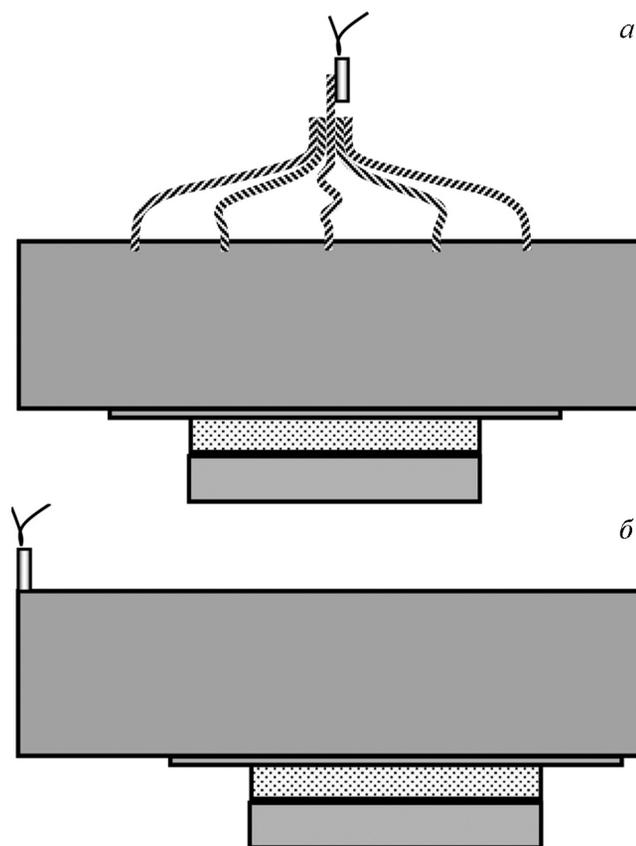


Рис. 15. Нанесение порошковых покрытий взрывом с помощью плоской (а) и скользящей (б) детонационной волны [30].

Fig. 15. Deposition of powder coatings by explosion using (a) plane and (b) sliding detonation waves [30].

$$\rho \cong (HV) \Theta^2 \frac{\Delta \Theta}{\Pi_0},$$

где HV – твердость исходного материала; Θ – его относительная плотность; Π_0 – исходная пористость.

Правильным подбором режима нагружения и использованием в качестве связки твердого сплава металла, способного к карбидообразованию (например, титана), можно добиться высокой твердости получаемого материала непосредственно после взрывной обработки без применения операции спекания за счет формирования прочной граничной фазы между компонентами порошковой смеси (рис. 14) [30]. В области низких давлений ($p < 8$ ГПа) удается получить спрессованный материал с относительно высокой пористостью, не превышающей 3%. При очень больших давлениях за счет интенсивного протекания реакций окисления компонентов смеси образуется так называемая пена, непригодная для использования.

При правильном подборе режимов нагружения удается получить качественные прессовки как из пластичных металлических материалов, так и из хрупких керамических.

НАНЕСЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ВЗРЫВОМ

Интересными являются разработанные в Волгоградском государственном техническом университете оригинальные методы нанесения взрывом на поверхность монолитных металлических заготовок порошковых покрытий из твердых сплавов [28; 30; 31].

В этом случае, как правило, используют нагружение плоской нормально падающей детонационной волной слоя исходной порошковой смеси карбида с металлической связкой, расположенного непосредственно на покрываемой поверхности заготовки (рис. 15а). Вместе с тем при взрывном плакировании порошковыми твердыми сплавами заготовок деталей достаточно большой площади скользящее нагружение (рис. 15б) является более удобным, чем нагружение нормально падающей детонационной волной, так как не требует применения громоздких генераторов плоской детонационной волны. Однако при этом может наблюдаться «снос» порошкового материала с поверхности по-

кряваемой заготовки, который связывают с чрезмерным макропластическим течением (сдвигом) спрессованного в ударной волне порошкового слоя по поверхности подложки.

Нами выявлены критические условия сохранения скомпактированного порошкового покрытия на поверхности стальной детали, связывающие состав порошковой смеси с массовой скоростью и скоростью детонации ВВ (рис. 16).

Прочность сцепления покрытия с основой достигает 80–100 МПа, что позволяет изготавливать из плакированных заготовок детали подшипников скольжения.

АКТИВАЦИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭНЕРГИЕЙ ВЗРЫВА

В конце 70-х годов прошлого века учеными Волгоградского государственного технического университета было обнаружено явление активизации порошковых полимерных материалов при обработке их взрывом [32–34], суть которого заключается в том, что при прохождении по порошку ударного фронта возникают активизированные состояния полимера. За счет микропластических деформаций во фронте ударной волны (УВ) образуются дефектные состояния физической и химической природы (рис. 17). Активным механизмом при высоком давлении, реализуемом при ударно-волновой обработке (УВО), является разрыв полимерной цепи с образованием макрорадикалов – своеобразных химических дефектов (микротрещин) (рис. 17). Ударная волна становится генератором дефектов с активацией химических реакций, а высокая плотность макрорадикалов при микропластической деформации способствует химическому течению. В условиях механических и тепловых полей и достаточно высоких для полимера температур, обеспечивающих подвижность элементов структуры и облегчение рекомбинации макрорадикалов и химические преобразования, происходит формирование новой структуры, в том числе с наноразмерными параметрами. При достаточно мощных давлениях развиваются высокие температуры, приводящие к деструкции, пиролизу или карбонизации полимера.

Взрывная обработка существенно изменяет морфологию полимеров. Так, после взрывной обработки порошка Ф-4 (ЭСМ) (рис. 18) в отличие от исходной волокнистой структуры появляются

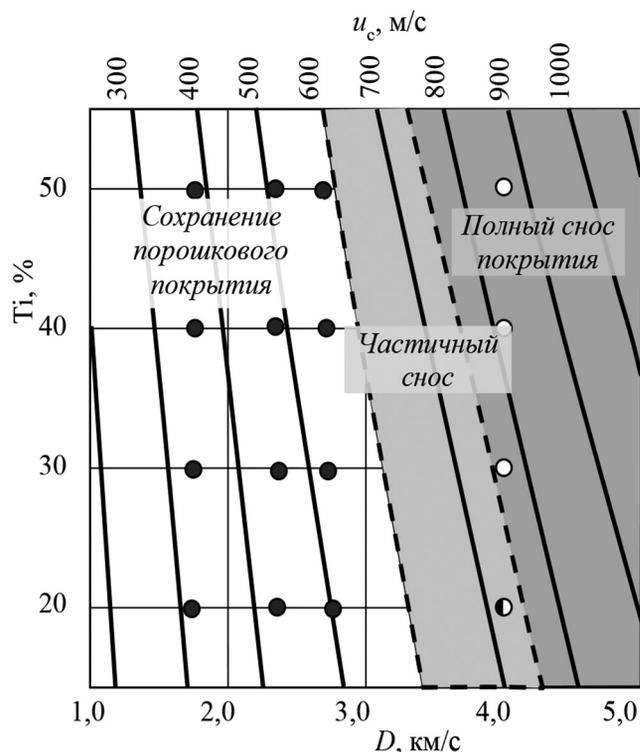


Рис. 16. Критические условия сохранения порошкового слоя $Cr_3C_2 + Ti$ [28].

Fig. 16. Critical conditions for the conservation of the $Cr_3C_2 + Ti$ powder layer [28].

плотные участки, соединенные пучками наноприл, аналогично крейзинговым структурам, образующимся при термическом растяжении пленок полимера.

Применение активированных полимерных порошков открыло новые технологические возможности по увеличению прочности слоистых композитов, получению равнопрочных сварных соединений фторопласта, полиэтилена и антикоррозионных, химически стойких покрытий из них на металлах, керамике, бетоне.

Так, помещение в зону стыкового соединения полимерных труб из фторопласта Ф-4 небольшого количества активированного взрывом порошка обеспечивает получение равнопрочного сварного соединения, что в обычных условиях невозможно. Активированные порошки позволяют решать задачи прочного соединения полимеров с металлами с помощью энергии взрыва, а также создавать сложные по структуре армированные металло-полимерные композиты.

Уникальные свойства активированных взрывом порошковых материалов реализованы при изготовлении:

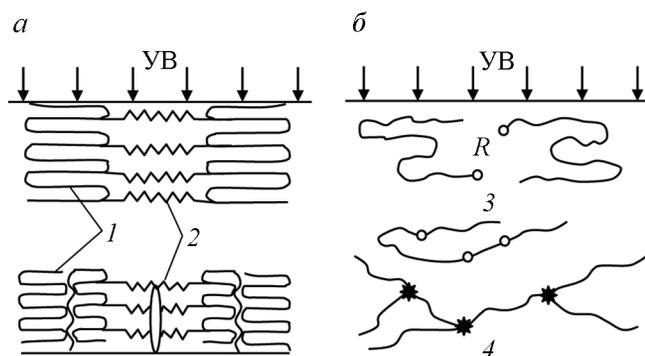


Рис. 17. Механизмы активации при УВО полимеров [34]: *a* – образование дефектов на кристаллических (1) и аморфных (2) участках; *б* – образование (3) и рекомбинация (4) макрорадикалов.

Fig. 17. Mechanisms of activation during SWP of polymers [34]: *a* – the formation of defects in crystalline (1) and amorphous (2) areas; *б* – formation (3) and recombination (4) of macroradicals.

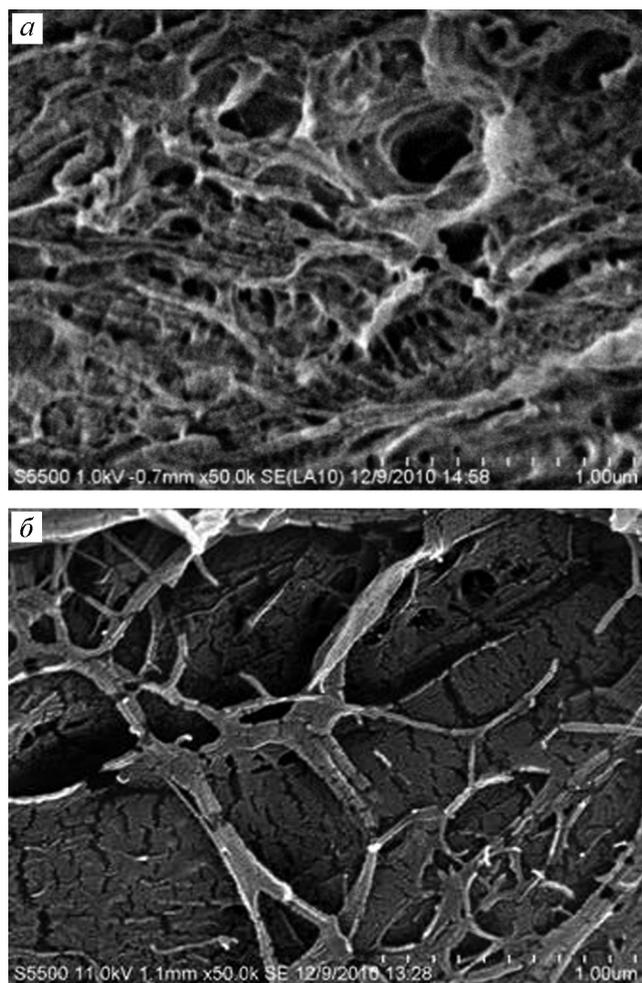


Рис. 18. Микроструктура полимера Ф-4 до (а) и после ударно-волновой активации (б) [34].

Fig. 18. Microstructure of polymer F-4 before (a) and after shock wave activation SWA (б) [34].

– сварных конструкций (оболочек, трубопроводов, переходников) из одно- и разнородных полимеров, в том числе фторопласта-4, практически не свариваемых существующими способами;

– новых антифрикционных материалов и технологий получения заготовок и изделий (подшипников скольжения, вкладышей, торцовых уплотнений, антикоррозионных полимерных покрытий на плоских и цилиндрических деталях);

– армированных многослойных материалов и изделий (уплотнительных и демпфирующих мембран из Ф-4, Ф-2М, СВМПЭ).

РЕЗКА МЕТАЛЛОВ ВЗРЫВОМ

В основе технологии резки металлов взрывом лежит явление кумуляции – пространственной концентрации энергии, выделяемой при детонации заряда ВВ. Если подрыв цилиндрического заряда ВВ, расположенного в контакте на поверхности металла, вызывает относительно небольшое деформирование его поверхности и локальное упрочнение металла, то профилирование на контактном торце заряда конусной (кумулятивной) выемки значительно увеличивает бризантный эффект. А покрытие кумулятивной выемки тонкой металлической облицовкой многократно форсирует пробивное действие энергии взрыва, приводя к формированию высокоскоростной кумулятивной струи.

Впервые этот эффект был обнаружен в 1864 г. М.М. Боресковым – русским военным инженером в области минного дела. Кстати, он прадед Георгия Константиновича Борескова – академика АН СССР, создателя и первого директора Института катализа Сибирского отделения РАН. Однако наиболее глубокие исследования в этой области выполнены в 1945 г. М.А. Лаврентьевым, который разработал гидродинамическую теорию кумуляции [35], а также позднее К.П. Станюковичем и рядом американских ученых [36].

Современные положения теории кумуляции позволяют оценить основные параметры процесса взаимодействия струи с преградой. Скорость движения кумулятивной струи можно рассчитать с помощью уравнения:

$$V = \eta \frac{0,41D}{\sqrt{\frac{M}{m_a} + \frac{1}{3} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}},$$

где D – скорость детонации ВВ; $m_a = 0,3\rho_0 r_0^3$ – ак-

тивная масса заряда ВВ; M – масса метаемой облицовки.

При этом скорость и глубина проникания струи в преграду зависят от соотношения плотностей тел:

$$U = V \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} + 1 \right)^{-0,5},$$

$$L = l \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2}},$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности металлов струи и преграды; l – длина струи.

Крайне успешное использование данного эффекта в военных целях предопределило не менее результативную его реализацию в решении сугубо мирных проблем по резке металлов и конструкций из них. Для этих целей усилиями украинских [37], российских [38] и американских [39] ученых были разработаны оригинальные удлиненные кумулятивные заряды (УКЗ) с медной или алюминиевой оболочками, представляющие собой профилированные металлические трубки с кумулятивной выемкой в форме полуцилиндра, наполненные высокобризантным ВВ – гексогеном (рис. 19).

Хотя уравнения классической гидродинамики в этом случае (для УКЗ) не вполне применимы, тем не менее экспериментальные исследования показывают, что эффективность применения таких зарядов зависит в первую очередь от диаметра заряда, кумулятивной воронки и фокусного расстояния (рис. 20).

Основной областью применения таких устройств является ремонт и технологическое обслуживание наземных и подводных нефтегазопроводов.

СИНТЕЗ АЛМАЗОВ

Алмаз как фазу высокой плотности начали получать из графита еще с 1960-х гг., используя для этого статическое сжатие. Поскольку взрыв – это удобный и дешевый генератор высоких давлений, идея сжатия с помощью энергии взрыва заманчивой выглядела давно.

Первый промышленный синтез искусственного алмаза был осуществлен в американской фирме «Du Pont de Nemours» в первой половине 1960-х гг. [40]. Смешанный с металлическим порошком графит размещали в ампуле и обжимали взрывом. С одной стороны, такая смесь была менее сжимаемой и нагрев среды был меньшим, с другой

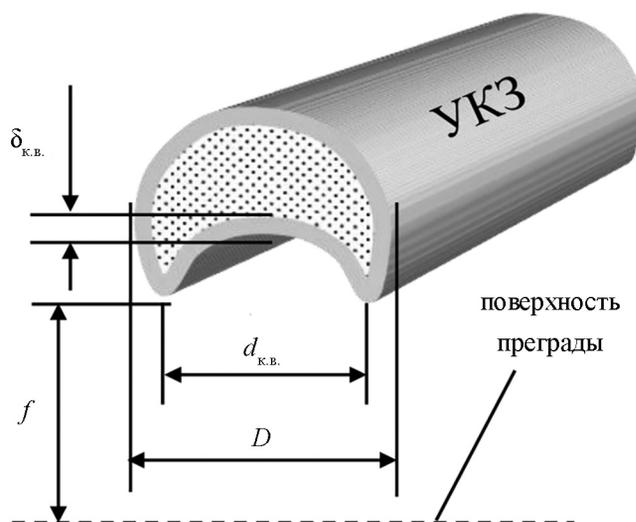


Рис. 19. Удлиненный кумулятивный заряд [37].
Fig. 19. Extended jet charge [37].

стороны, металл быстро отводил тепло от частиц образовавшегося алмаза.

Несколько иной способ был разработан в Институте химической физики РАН (г. Черноголовка): здесь графит непосредственно смешивали с порошкообразным ВВ, что значительно удешевляло технологию. В обоих случаях получали частицы микронного размера.

Еще один способ получения детонационного алмаза примерно в то же время был разработан во ВНИИ технической физики (Челябинск-70) под руководством Е.И. Забабахина, где алмазы синтезиро-

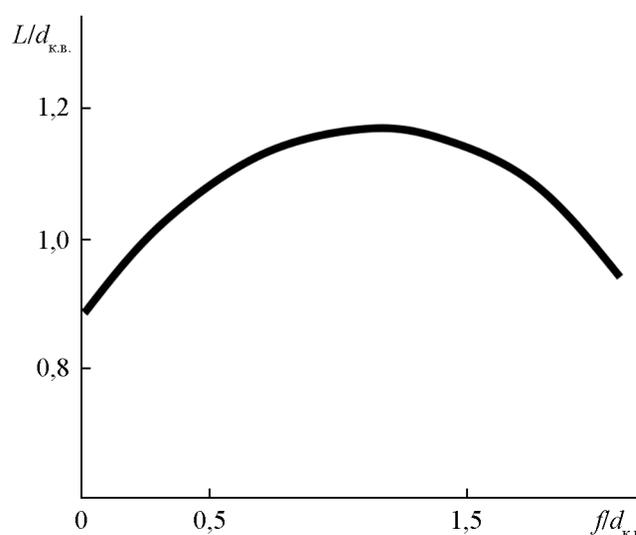


Рис. 20. Влияние относительного фокусного расстояния $f/d_{к.в.}$ на относительную глубину реза $L/d_{к.в.}$ [38].
Fig. 20. Influence of relative focal length $f/d_{к.в.}$ to the relative depth of cut $L/d_{к.в.}$ [38].

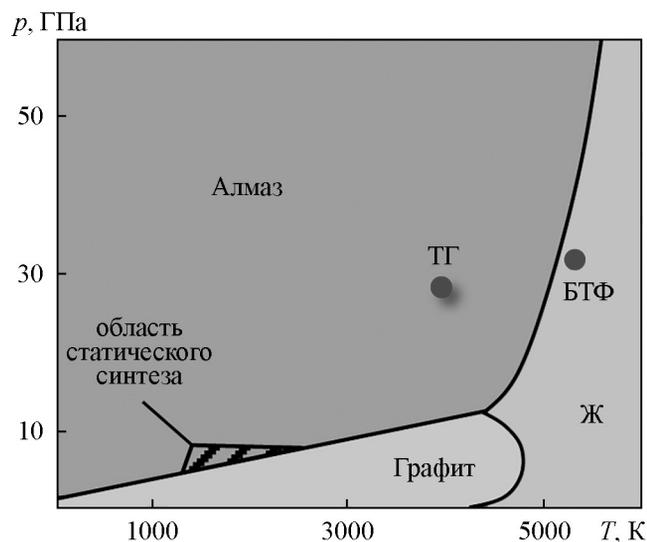


Рис. 21. Фазовая диаграмма углерода [40]; точки – состояния в детонационной волне смеси 50 % ТНТ / 50 % гексогена (ТГ) и бензотрифуроксан.

Fig. 21. Phase diagram of carbon [40]; dots – states in the detonation wave of a mixture of 50% TNT / 50% hexogen (ТН) and benzotrifuroxan.

вали непосредственно при взрыве ВВ, содержащих в продуктах детонации большой избыток углерода, например ТГ (ТНТ + гексоген) или БТФ (бензотрифуроксан). На основании фазовой диаграммы углерода (рис. 21) и значений p , t точки Жуге при детонационном разложении ВВ было показано, что свободный углерод должен конденсироваться в форме алмаза, что и происходило.

На сегодняшний день не существует единой теории образования детонационного наноалмаза (ДНА). Согласно представлениям о термодинамике образования ДНА основным аспектом, обеспечивающим возможность формирования алмазов в процессе адиабатического распада углерода взрывчатого вещества с отрицательным кислородным балансом, является факт конденсации свободного углерода в алмазной или жидкой фазе. Адиабатическое расширение продуктов детонации следует за детонацией. При этом условия стабильности алмаза сохраняются недолго. Если плотность продуктов детонации близка к начальной плотности взрывчатого вещества, то условия стабильности алмаза сменяются условиями стабильности графита. При адиабатическом разлете давление продуктов детонации падает быстрее температуры, поэтому термодинамическое состояние углеродной компоненты оказывается в области устойчивости графита при высокой температуре, что способствует фазо-

вому переходу алмаза в графит. Но при некоторой температуре скорость графитизации понижается, и поэтому на этих (последних) стадиях разлета продуктов детонации количество углерода, перешедшего из алмазной фазы в графитную, становится пренебрежимо малым – это «заморозка» графитизации и сохранение алмазной фазы. Таким образом, переход алмаз – графит происходит при условии превышения температуры заморозки графитизации. Если $T \gg T_{\text{зам}}$, то весь алмаз успевает превратиться в графит и в остывших продуктах детонации ДНА не обнаруживается.

Такой метод синтеза давал выход детонационных алмазов в 8–17 % от массы заряда, однако их размеры не превышали 10 нм, и они оказались в то время неостребованными, и исследования были приостановлены.

В 1982 г. синтез наноалмазов из собственного углерода ВВ был возобновлен в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева А.М. Ставером и позже налажен сразу в нескольких научных центрах СССР, однако мощности производства существенно превосходили потребность промышленности в них.

В 1993 г. ряд производств был свернут, и вплоть до 2003 г. его не возобновляли. До настоящего времени сохранились производства ДНА в Санкт-Петербурге, Снежинске, в Белоруссии и на Украине. В последнее время интерес к ДНА начал снова проявляться у исследователей во всем мире.

Начиная с конца 1990-х гг. ДНА использовались как компонент сорбентов смазок, полировочных композиций и как добавка к электролитическим и другим осадительным ваннам. До сих пор много потенциальных применений этого наноматериала, включая биомедицинские области и области структурных композитов, остаются неосвоенными.

ДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН НА СЕМЕНА РАСТЕНИЙ

Одним из новых и необычных приложений по использованию энергии взрыва является разработанный в Волгоградском государственном техническом университете метод экстремального воздействия на семена растений импульсным давлением, создаваемым ударной волной [41], согласно которому на дно стального контейнера укладывают кассету с семенами, а сам контейнер заполняют водой, при этом ВВ расчетной массы устанавливают на опреде-

ленном расстоянии от поверхности семян и производят подрыв.

В момент взаимодействия ударной волны с семенами давление на фронте, вычисленное по формуле

$$p = 533 \left(\frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1,13},$$

составляло от 8 до 40 МПа в соот-

ветствии с режимами обработки, а мгновенное значение температуры на фронте волны при времени прохождения фронта 13,9–22,7 мкс не превышало 300–302 К, поэтому на семена преимущественное действие оказывало давление, а не температура.

В полимерах вообще при прохождении ударных волн возникают сдвиговые деформации, разрываются химические связи, происходят фазовые переходы. При импульсных давлениях порядка 3–35 МПа синтез вещества маловероятен, как и образование свободных радикалов, происходящее в ударной волне при высоких температурах, что в используемой схеме невозможно. Однако в ударных волнах возможен переход биополимеров в стеклообразное состояние, что продлевает жизнь семян. Стеклообразные тела при кратковременных воздействиях дробятся, а последствие импульсных давлений развивается у проростков и взрослых растений. Так, у растений гречихи, ячменя, огурца, томатов и многих других в зависимости соотношения «доза – эффект» существуют три характерные зоны (рис. 22): 1) общей стимуляции, 2) переходного состояния и 3) стресса.

В зоне общей стимуляции при действии давления амплитудой в диапазоне 5–20 МПа всхожесть не снижается, а урожай возрастает на 15–25 % за счет стимуляции физиологических процессов. В стрессовом состоянии при давлениях свыше 26 МПа обнаруживается гибель семян, отбор мало- и среднепродуктивных растений, нарушение физиологических процессов, отток запасных веществ в плоды и 2–3-кратное увеличение урожая (срабатывает принцип «я погибну, а потомство выживет»). Увеличение вариабельности признаков (большой разброс значений всхожести и урожая) при давлении 20–26 МПа соответствует переходному состоянию 2.

У растений с твердыми семенными покровами (гледичия, робиния, дуб, породы хвойных – это деревья, широко используемые в озеленении; козлятник – многолетняя кормовая трава) после обработки импульсным давлением (ИД) увеличивается

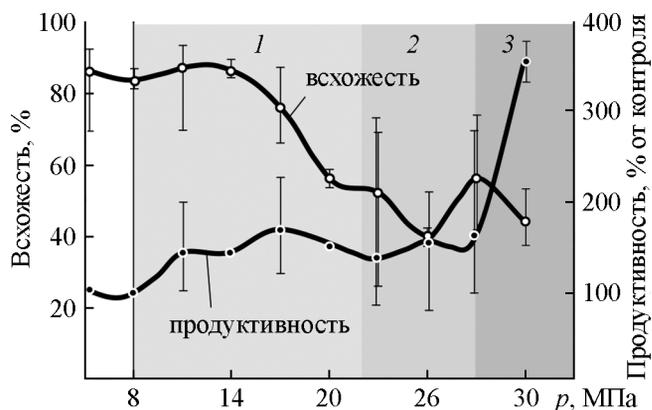


Рис. 22. Действие ударной волны на всхожесть семян и продуктивность гречихи [41].

Fig. 22. Effect of shock wave on seed germination and productivity of buckwheat [41].

всхожесть за счет расширения трещин в семенной коже. Это облегчает проникновение воды и диффузию газов в семя при прорастании.

В совместных исследованиях с коллегами из Пармского университета (Италия) показано изменение количественного и качественного состава белков в прорастающих семенах, что указывает на изменение активности кодирующих их генов. Планируется выделение специфических стрессовых белков, выяснение их структуры, частных функций, а также возможностей регуляции генов под действием факторов окружающей среды, в том числе под действием давления.

ДРУГИЕ ВЗРЫВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Применение энергии взрыва оказалось также эффективным в решении проблем ремонта, восстановления и монтажа сложных узлов и конструкций.

Так, в 1980-х гг. была разработана и реализована с помощью сварки взрывом уникальная технология заделки пробоины, полученной по неосторожности при монтажных работах, на готовом изделии – корпусе топливного бака сверхтяжелой ракеты «Энергия-Буран» диаметром 16 м. Эта работа была выполнена сотрудниками Института электросварки им. Е.О. Патона в г. Самаре с применением небольшого цилиндрического заряда ВВ.

Похожая технология разработана для восстановления боеспособности бронетехники после поражения ее кумулятивными снарядами в полевых условиях. Ремонтный комплект, состоящий из металлической пластины и укрепленного на ней ци-

линдрического заряда ВВ, может быть достаточно быстро смонтирован на пробойне, после чего осуществлен процесс заварки пораженного места.

Определенные возможности открывает технология соединения деталей клепкой с помощью малых порций ВВ.

Весьма перспективным направлением промышленного использования взрыва является комбинированная технология сварки отводов в нефте- и газопроводы без остановки подачи продуктов, согласно которой на магистральный трубопровод сваркой взрывом приваривается профилированная стальная пластина через медный подслоя, а затем с помощью специального оборудования вырезается

отверстие и вваривается отвод с помощью электродуговой сварки [42]. Технология разработана в Институте электросварки им. Е.О. Патона.

Для узлов и агрегатов теплообменного и нефтехимического оборудования нашла широкое применение взрывная развальцовка труб в трубных доках. Установленные внутрь трубок через пластиковые муфты заряды ВВ обычно в виде отрезков детонирующего шнура подрывают одновременно по всей поверхности решетки. Трубки развальцовываются, обеспечивая плотную посадку в отверстия, а последующая обварка трубки дуговой сваркой обеспечивает надежную герметизацию межтрубного пространства [43; 44].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Foxe J. 2011. *The acts and monuments of John Foxe: with a life of the martyrologist, and vindication of the work, Volume 4*. Moscow, Nobel Press: 832 p.
2. Зимин А.А., Хорошкевич А.Л. 1982. *Россия времени Ивана Грозного*. М., Наука: 186 с.
3. Лаврентьев М.А. 1980. *Прирастать будет Сибирью*. М., Молодая гвардия: 175 с.
4. Munroe C.E. 1888. Modern Explosives. *Scribner's Magazine*. 3: 563–576.
5. Johnson W.C. *A method of generating fluid pressure for tube jointing, or embossing, stamping of metals sheets, and such like operations*. GB Patent 21840, 23 September 1897.
6. Newton Jones I. *Method for forming sheet-metal bodies*. US Patent 939702, 9 November 1909.
7. Foley F.B., Howell S.P. 1923. Neumann bands as evidence of action of explosive upon metal. *Transaction AIME*. 68: 891–915.
8. Foley F.B., Crawshaw J.E. 1926. Effect of air gap in explosive system on production of Neumann bands. *Transaction AIME*. 73: 948–967.
9. Smith C.S. 1958. Metallographic studies of metals after explosive shock. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 212: 574–576.
10. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. 1966. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М., Наука: 686 с.
11. Bancroft D., Peterson E.L., Minshal S. 1956. Polymorphism of iron at high pressure. *Journal of Applied Physics*. 27(3): 291–298. doi: 10.1063/1.1722359
12. Райе М., Мак-Куин Р., Уолш Дж. 1965. Сжатие твердых тел сильными ударными волнами. В кн.: *Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях*. М., Наука: 10–92.
13. Cole D.W. *Explosive forming in liquid*. US Patent 2983242, 9 May 1961.
14. Drexelius V.W. *Metal forming*. US Patent 3036373, 9 May 1962.
15. Wilson F.W. 1964. *High-velocity forming of metals*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.: 188 p.
16. Анучин М.А. 1972. *Штамповка взрывом. Основы теории*. М., Машиностроение: 152 с.
17. Седых В.С., Дерибас А.А., Биченков Е.И., Тришин Ю.А. 1962. Сварка взрывом. *Сварочное производство*. 2: 6–9.
18. Лысак В.И., Кузьмин С.В. 2005. *Сварка взрывом*. М., Машиностроение-1: 544 с.
19. Lysak V.I., Kuzmin S.V. 2012. Lower boundary of metal explosive welding. Evolution of ideas. *Journal of Materials Processing Technology*. 212(1): 150–156. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.08.017
20. Кузьмин С.В., Лысак В.И. 1991. Основные закономерности перехода к безволновым режимам формирования соединения при сварке взрывом. В кн.: *Сварка взрывом и свойства сварных соединений: Межвузовский сборник научных трудов*. Волгоград, Волгоградский политехнический институт: 29–38.
21. Лысак В.И., Кузьмин С.В., Кривенцов А.Н., Кузьмин В.И. 2005. Физические основы и области практического применения сварки металлов взрывом. *Наука – производству*. 1: 17–21.
22. Лысак В.И., Кузьмин С.В. 2008. Деформационно-энергетические аспекты и примеры практического применения процесса сварки взрывом. *Автоматическая сварка*. 11: 108–115.
23. Кузьмин В.И., Пронин В.А., Соннов А.П. 1988. Сварка взрывом с одновременной штамповкой. В кн.: *Материалы VII Международной конференции «Использование энергии взрыва для производства металлических материалов с новыми свойствами» (Пардубице, ЧССР, 25–27 октября 1988 г.)*. Пардубице, Пардубицкий университет: 102–107.
24. Kuzmin V.I., Lysak V.I., Kuzmin E.V. 2020. Regularities in bimetal joint formation at explosion welding with simultaneous stamping. *Materials Science Forum*. 989: 733–738. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.733
25. Труфяков В.И. 1973. *Усталость сварных соединений*. Киев, Наукова думка: 216 с.
26. Loosemore G.R., Peapell P.N., Walkley E.C., Goodall J.A. 1984. Shock loading improves joint properties in maraging steels. *Welding and Metal Fabrication*. 5: 191–192, 194, 196–197.

27. Петушков В.Г., Кудинов В.М., Фадеев Ю.И. 1993. *Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций*. М., Металлургия: 160 с.
28. Лысак В.И., Крохалев А.В., Кузьмин С.В., Рогозин В.Д., Каунов А.М. 2015. *Прессование порошков взрывом*. М., Машиностроение: 252 с.
29. Бальшин М.Ю. 1972. *Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна*. М., Металлургия: 336 с.
30. Крохалев А.В., Харламов В.О., Кузьмин С.В., Лысак В.И. 2018. Основы технологии получения износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой взрывным прессованием. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 3: 68–83. doi: 10.17073/0021-3438-2018-3-68-83
31. Крохалев А.В., Харламов В.О., Черников Д.Р., Балагуров А.С., Кузьмин С.В., Лысак В.И. 2021. Технология нанесения покрытий из твердых сплавов на рабочие поверхности деталей узлов трения. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 11(258): 55–60. doi: 10.35211/1990-5297-2021-11-258-55-60
32. Павлов А.И., Адаменко Н.А. 1981. Воздействие ударных волн на металлополимерные композиции. В кн.: *Труды II-го совещания по обработке материалов взрывом (Новосибирск, 5–8 октября 1981 г.)*. Новосибирск, Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева: 174–176.
33. Павлов А.И., Адаменко Н.А., Трыков Ю.П. 1990. Опыт использования энергии взрыва для создания новых композиционных материалов на основе фторопласта-4 и сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Конструкции из композиционных материалов*. 3: 41–46.
34. Адаменко Н.А., Фетисов А.В., Казуров А.В. 2007. *Взрывная обработка металлополимерных композиций*. Волгоград, Политехник: 240 с.
35. Лаврентьев М.А. 1957. Кумулятивный заряд и принципы его работы. *Успехи математических наук*. 4: 41–56.
36. *Физика взрыва. Том 2*. 2004. М., Наука: 656 с.
37. Волгин Л.А., Кудинов В.М., Гумеров А.Г. 1974. Применение энергии взрыва для резки магистральных нефтепроводов. В кн.: *Трубопроводный транспорт нефти*. Уфа, Всероссийский научно-исследовательский институт по сбору, подготовке и транспортировке нефти и нефтепродуктов: 139–144.
38. Калашников В.В., Деморецкий Д.А., Трохин О.В., Сулейманов Р.Р., Рогожин П.В. 2011. Способы повышения эффективности действия кумулятивных взрывных устройств для перфорации нефте- и газодобывающих скважин. *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 4(32): 200–205.
39. Райнхарт Дж.С., Пирсон Дж. 1966. *Взрывная обработка металлов*. М., Мир: 392 с.
40. De Carly P.S., Jamieson T.S. 1961. Formation of diamond by explosive shock. *Science*. 133(3466): 1821–1823.
41. Нефедьева Е.Э., Лысак В.И. 2009. *Давление как фактор регуляции у растений*. Волгоград, Волгоградский государственный технический университет: 188 с.
42. Добрушин Л.Д., Волошко С.А., Иващенко Г.А., Ющак П.Т. 1985. Опыт подключения отводов к действующим магистральным трубопроводам под давлением. В кн.: *Применение энергии взрыва в сварочной технике*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона: 80–90.
43. Луковкин А.И. 1966. Запрессовка труб взрывом. *Судостроение*. 3: 54–58.
44. Степанов В.Г. 1969. Технология развальцовки труб взрывом в трубных досках. *Кузнечно-штамповые производства*. 5: 22–24.

REFERENCES

1. Foxe J. 2011. *The acts and monuments of John Foxe: with a life of the martyrologist, and vindication of the work, Volume 4*. Moscow, Nobel Press: 832 p.
2. Zimin A.A., Khoroshkevich A.L. 1982. *Rossiya vremeni Ivana Groznogo. [Russia in the time of Ivan the Terrible]*. Moscow, Nauka: 186 p. (In Russian).
3. Lavrent'ev M.A. 1980. *Prirastat' budet Sibir'yu. [Russia's power will grow with Siberia]*. Moscow, Molodaya gvardiya: 175 p. (In Russian).
4. Munroe C.E. 1888. Modern Explosives. *Scribner's Magazine*. 3: 563–576.
5. Johnson W.C. *A method of generating fluid pressure for tube jointing, or embossing, stamping of metals sheets, and such like operations*. GB Patent 21840, 23 September 1897.
6. Newton Jones I. *Method for forming sheet-metal bodies*. US Patent 939702, 9 November 1909.
7. Foley F.B., Howell S.P. 1923. Neumann bands as evidence of action of explosive upon metal. *Transaction AIME*. 68: 891–915.
8. Foley F.B., Crawshaw J.E. 1926. Effect of air gap in explosive system on production of Neumann bands. *Transaction AIME*. 73: 948–967.
9. Smith C.S. 1958. Metallographic studies of metals after explosive shock. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 212: 574–576.
10. Zel'dovich Ya.B., Rayzer Yu.P. 1966. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy. [Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena]*. Moscow, Nauka: 686 p. (In Russian).
11. Bancroft D., Peterson E.L., Minshal S. 1956. Polymorphism of iron at high pressure. *Journal of Applied Physics*. 27(3): 291–298. doi: 10.1063/1.1722359
12. Rayet M., McQueen R., Walsh J. 1965. [Compression of solids by strong shock waves]. In: *Dinamicheskie issledovaniya tverdykh tel pri vysokikh davleniyakh. [Dynamic studies of solids at high pressures]*. Moscow, Nauka: 10–92. (In Russian).
13. Cole D.W. *Explosive forming in liquid*. US Patent 2983242, 9 May 1961.
14. Drexelius V.W. *Metal forming*. US Patent 3036373, 9 May 1962.
15. Wilson F.W. 1964. *High-velocity forming of metals*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.: 188 p.
16. Anuchin M.A. 1972. *Shtampovka vzryvom. Osnovy teorii. [Explosion stamping. Basics of the theory]*. Moscow, Mashinostroenie: 152 p. (In Russian).
17. Sedykh V.S., Deribas A.A., Bichenkov E.I., Trishin Yu.A. 1962. [Explosive welding]. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2: 6–9. (In Russian).

18. Lysak V.I., Kuzmin S.V. 2005. *Svarka vzryvom*. [Explosive welding]. Moscow, Mashinostroenie-1: 544 p. (In Russian).
19. Lysak V.I., Kuzmin S.V. 2012. Lower boundary of metal explosive welding. Evolution of ideas. *Journal of Materials Processing Technology*. 212(1): 150–156. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.08.017
20. Kuzmin S.V., Lysak V.I. 1991. [Main regularities of transfer to waveless modes of joint formation in explosive welding]. In: *Svarka vzryvom i svoystva svarnykh soedineniy: Mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov*. [Explosive welding and properties of welded joints. Interuniversity collection of scientific papers]. Volgograd, Volgograd Polytechnic Institute: 29–38. (In Russian).
21. Lysak V.I., Kuzmin S.V., Kriventsov A.N., Kuz'min V.I. 2005. [Physical foundations and practical applications of explosive welding of metals]. *Nauka – proizvodstvu*. 1: 17–21. (In Russian).
22. Lysak V.I., Kuzmin S.V. 2008. Deformation-energy aspects and practical applications of explosion welding process. *The Paton Welding Journal*. 11: 92–98.
23. Kuzmin V.I., Pronin V.A., Sonnov A.P. 1988. [Explosion welding with simultaneous stamping]. In: *Materialy VII Mezhdunarodnoy konferentsii "Ispol'zovanie energii vzryva dlya proizvodstva metallicheskikh materialov s novymi svoystvami"*. [Using the explosive energy to produce metallic materials with new properties (Pardubice, Czechoslovak Socialist Republic, 25–27 October 1988)]. Pardubice, University of Pardubice: 102–107. (In Russian).
24. Kuzmin V.I., Lysak V.I., Kuzmin E.V. 2020. Regularities in Bimetal Joint Formation at Explosion Welding with Simultaneous Stamping. *Materials Science Forum*. 989: 733–738. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.733
25. Trufyakov V.I. 1973. *Ustalost' svarnykh soedineniy*. [Weld fatigue]. Kiev, Naukova dumka: 216 p. (In Russian).
26. Loosemore G.R., Peapell P.N., Walkley E.C., Goodall J.A. 1984. Shock loading improves joint properties in maraging steels. *Welding and Metal Fabrication*. 5: 191–192, 194, 196–197.
27. Petushkov V.G., Kudinov V.M., Fadeenko Yu.I. 1993. *Obrabotka vzryvom svarnykh soedineniy metallokonstruktsiy*. [Explosion treatment of welded joints of metal structures]. Moscow, Metallurgiya: 160 p. (In Russian).
28. Lysak V.I., Krokhaliev A.V., Kuzmin S.V., Rogozin V.D., Kaunov A.M. 2015. *Pressovanie poroshkov vzryvom*. [Explosive pressing of powders]. Moscow, Mashinostroenie: 252 p. (In Russian).
29. Bal'shin M.Yu. 1972. *Nauchnye osnovy poroshkovoy metallurgii i metallurgii volokna*. [Scientific foundations of powder metallurgy and fiber metallurgy]. Moscow, Metallurgiya: 336 p. (In Russian).
30. Krokhaliev A.V., Kharlamov V.O., Kuzmin S.V., Lysak V.I. 2018. Foundations of the fabrication technology of wear-resistant coatings made of mixtures of chromium carbide powders with a metallic binder by explosive pressing. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 59(4): 419–432. doi: 10.3103/S1067821218040107
31. Krokhaliev A.V., Kharlamov V.O., Chernikov D.R., Balagurov A.S., Kuz'min S.V., Lysak V.I. 2021. [Technology of deposition of coatings from hard alloys on the working surfaces of friction units]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 11(258): 55–60. (In Russian). doi: 10.35211/1990-5297-2021-11-258-55-60
32. Pavlov A.I., Adamenko N.A. 1981. [Impact of shock waves on metal-polymer compositions]. In: *Trudy II-go soveshchaniya po obrabotke materialov vzryvom*. [Proceedings of the 2nd meeting on the processing of materials by explosion (Novosibirsk, USSR, 5–8 October 1981)]. Novosibirsk, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics: 174–176. (In Russian).
33. Pavlov A.I., Adamenko N.A., Trykov Yu.P. 1990. [Experience in using explosion energy to create new composite materials based on fluoroplast-4 and ultra-high molecular weight polyethylene]. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov*. 3: 41–46. (In Russian).
34. Adamenko N.A., Fetisov A.V., Kazurov A.V. 2007. *Vzryvnaya obrabotka metallopolimernykh kompozitsiy*. [Explosive processing of metal-polymer compositions]. Volgograd, Politehnik: 240 p. (In Russian).
35. Lavrent'ev M.A. 1957. [Shaped charge and principles of its operation]. *Uspekhi matematicheskikh nauk*. 4: 41–56. (In Russian).
36. *Fizika vzryva. Tom 2*. [Explosion physics. Volume 2]. 2004. Moscow, Nauka: 656 p. (In Russian).
37. Volgin L.A., Kudinov V.M., Gumerov A.G. 1974. [The use of explosion energy for cutting main oil pipelines]. In: *Truboprovodnyy transport nefii*. [Pipeline transportation of oil]. Ufa, All-Russian Research Institute for the Collection, Preparation and Transportation of Oil and Oil Products: 139–144. (In Russian).
38. Kalashnikov V.V., Demorecky D.A., Trohin O.V., Suleymanov R.R., Rogozhin P.V. 2011. [Methods improvement of shaped charges for perforation oil and gas wells]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya "Tekhnicheskie nauki"*. 4(32): 200–205. (In Russian).
39. Rinehart J.S., Pearson J. 1966. *Vzryvnaya obrabotka metallov*. [Explosive processing of metals]. Moscow, Mir: 392 p. (In Russian).
40. De Carly P.S., Jamieson T.S. 1961. Formation of diamond by explosive shock. *Science*. 133(3466): 1821–1823.
41. Nefed'eva E.E., Lysak V.I. 2009. *Davlenie kak faktor regulyatsii u rasteniy*. [Pressure as a regulatory factor in plants]. Volgograd, Volgograd State Technical University: 188 p. (In Russian).
42. Dobrushin L.D., Voloshko S.A., Ivashchenko G.A., Yushchak P.T. 1985. [Experience in connecting taps to existing main pipelines under pressure]. In: *Primenenie energii vzryva v svarochnoy tekhnike*. [Application of explosive energy in welding technology]. Kiev, E.O. Paton Electric Welding Institute: 80–90. (In Russian).
43. Lukovkin A.I. 1966. [Pipe pressing by explosion]. *Sudostroenie*. 3: 54–58. (In Russian).
44. Stepanov V.G. 1969. [Explosive tube expansion technology in tube sheets]. *Kuznechno-shtampovye proizvodstva*. 5: 22–24 (In Russian).

Поступила 29.08.2022