

**СНИЖЕНИЕ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДОНАПОЛНЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОЦЕССАХ ПЛАКИРОВАНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ ВЗРЫВОМ****В. Г. Загорянский, В. В. Драгобецкий, В. Т. Щетинин, В. Н. Чебенко**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: zagor\_vlad@ukr.net

Обоснована возможность и целесообразность применения водонаполненных взрывчатых веществ взамен порошкообразных для процессов импульсной металлообработки – штамповки, плакирования, сварки и упрочнения взрывом. Приведено решение вопроса использования взрывчатых веществ с низкой скоростью детонации в процессе упрочнения взрывом. Проведено детальное исследование научно-технической информации по использованию водонаполненных взрывчатых веществ и изучение их свойств. Краевые эффекты при использовании водонаполненных взрывчатых веществ изучены экспериментально с использованием модифицированного метода вставок. Совершенствование метода вставок достигнуто при изучении совместной пластической деформации и плакирования (сварки) взрывом перфорированных и заготовок с отверстиями. Установлена перспективность использования водонаполненных взрывчатых веществ в технологиях импульсной металлообработки. Краевые эффекты при использовании водонаполненных взрывчатых веществ, связанные с боковым разлетом, кривизной плоских деталей. Стабильность свойств по всей площади сварного соединения или упрочняемой поверхности в несколько раз выше, чем при использовании насыпных взрывчатых веществ. Предложена новая технологическая схема упрочнения взрывом с применением водонаполненных взрывчатых веществ. Разработаны модифицированный метод оценки деформаций плакирующего слоя, обеспечивающий самопроизвольное затекание более мягкого материала в более твердый. Предложена новая технологическая схема упрочнения – импульсно-фрикционная обработка, обеспечивающая интенсивное пластическое деформирование упрочняемого поверхностного слоя в сочетании с ударно-волновым нагружением.

**Ключевые слова:** импульсные процессы металлообработки, водонаполненные взрывчатые вещества, наноматериалы, фрикционное упрочнение, краевой эффект, метод вставок.

**ЗНИЖЕННЯ КРАЙОВОГО ЕФЕКТУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДОНАПОВНЕНИХ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН У ПРОЦЕСАХ ПЛАКУВАННЯ І ЗМІЦНЕННЯ ВИБУХОМ****В. Г. Загоряньський, В. В. Драгобецький, В. Т. Щетинін, В. Н. Чебенко**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: zagor\_vlad@ukr.net

Обґрунтовано можливість і доцільність застосування водонаповнених вибухових речовин замість порошкоподібних для процесів імпульсної металообробки - штампування, плакування, зварювання і зміцнення вибухом. Наведено вирішення питання використання вибухових речовин з низькою швидкістю детонації в процесі зміцнення вибухом. Проведено детальне дослідження науково-технічної інформації по використанню водонаповнених вибухових речовин і вивчення їх властивостей. Крайові ефекти при використанні водонаповнених вибухових речовин вивчені експериментально з використанням модифікованого методу вставок. Удосконалення методу вставок досягнуто при вивченні спільної пластичної деформації і плакування (зварювання) вибухом перфорованих і заготовок з отворами. Встановлено перспективність використання водонаповнених вибухових речовин в технологіях імпульсної металообробки. Крайові ефекти при використанні водонаповнених вибухових речовин, пов'язані з боковим розльотом, кривизною плоских деталей. Стабільність властивостей по всій площі зварного з'єднання або поверхні, що зміцнюється, в кілька разів вище, ніж при використанні насипних вибухових речовин. Запропоновано нову технологічну схему зміцнення вибухом із застосуванням водонаповнених вибухових речовин. Розроблено модифікований метод оцінки деформацій плакуючого шару, що забезпечує мимовільне затікання більш м'якого матеріалу в більш твердий. Запропоновано нову технологічну схему зміцнення - імпульсно-фрикційна обробка, що забезпечує інтенсивне пластичне деформування зміцнюваного поверхневого шару в поєднанні з ударно-хвильовим навантаженням.

**Ключові слова:** імпульсні процеси металообробки, водонаповнені вибухові речовини, наноматеріали, фрикційне зміцнення, крайовий ефект, метод вставок.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** При обработке металлов взрывом в процессах штамповки, плакирования, сварки, упрочнения, спрессования некомпактных материалов, резания, брикетирования металлической стружки и т. д. применяются взрывчатые вещества, среди которых наиболее употребляемыми являются бризантные взрывчатые вещества (аммонит, сварочный аммонит), метателные взрывчатые вещества (порох) и пластичные взрывчатые вещества (гексопласт).

При применении порошкообразных взрывчатых веществ при плакировании (сварке) взрывом возни-

кает коробление и прогиб свариваемых пластин, а также неравномерность толщины плакирующего слоя и нежелательная деформация свободных граней биметаллических заготовок (рис. 1).

При упрочнении взрывом возникает неравномерность механических свойств по упрочняемой поверхности и, как следствие, неравномерный износ при эксплуатации [1–7].



Рисунок 1 – Деформация свободных граней заготовки после плакирования (сварки) взрывом

Учитывая также, что производство аммонита и гексопласта непрерывно сокращается и эти взрывчатые вещества не в полной мере удовлетворяют технологиям взрывной обработки металлов, возникает необходимость в использовании новых взрывчатых веществ. Эти взрывчатые вещества должны обладать стабильными детонационными характеристиками независимо от климатических условий и условий формирования заряда и быть более технологичными с точки зрения механизации процессов изготовления зарядов [4].

Перспективным для плакирования и сварки взрывом является применение водонаполненных взрывчатых веществ (ВВВ), которые широко применяются для ведения открытых взрывных работ, в сейсморазведке, для взрывных работ в шахтах и рудниках. Белорусскими учеными разработано ВВВ непосредственно для плакирования и сварки взрывом. По сравнению с порошковыми взрывчатыми веществами, ВВВ обладают следующими преимуществами: более низкая чувствительность к механическим и тепловым воздействиям, малая токсичность взрывчатых веществ и продуктов взрыва, стабильность детонационных характеристик, возможность механизации процессов изготовления зарядов и др.

Изготовление зарядов из ВВВ по сравнению с изготовлением насыпных взрывчатых веществ имеет свои особенности. ВВВ находятся в вязком, консистентном состоянии и обладают хорошей сцепляемостью и смачиваемостью с металлами, деревом, пластиком и картоном.

Приготовленная масса ВВВ раскатывается валками до необходимой для плакирования или сварки взрывом толщины. Плоские заряды укладываются в стеллажи до окончания процесса аэрации и сшивания. Приготовленные заряды могут храниться в течение месяца без изменения свойств. Для операций штамповки взрывом и спрессовывания некомпактных материалов более целесообразно изготавливать цилиндрические и трубчатые заряды, например, экструзией.

Цель работы – экспериментальное обоснование возможности и целесообразности применения водонаполненных взрывчатых веществ взамен порошкообразных для процессов импульсной металлообработки – штамповки, плакирования, сварки и упрочнения взрывом.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Одним из преимуществ ВВВ является то, что краевые эффекты при его использовании выражены гораздо меньше. Для проверки этого факта выполнен ряд экспериментальных исследований.

Импульс давления ВВВ при детонации сильно растянут во времени по сравнению с аммонитом. Для операций формоизменения, компактирования и сварки (плакирования) взрывом это положительный фактор [3]. Однако при упрочнении взрывом предпочтительнее использовать взрывчатые вещества (ВВ) с высокой скоростью детонации. Традиционными схемами упрочнения являются схемы упрочнения металлов плоской и бегущей ударными волнами от соударения с метаемой пластиной. Находят применение и более эффективные схемы упрочнения – через твердую защитную среду, многократного сжатия металлов отраженными ударными волнами, двухстадийного, взрывотермического [10].

Для исследования деформированного состояния по толщине сваренных взрывом заготовок применяют следующие методы:

– метод координатной сетки [8, 9],

– метод вставок [2],

– металлографический метод [8],

– метод исследования напряженно-деформированного состояния по распределению твердости [8, 9] и др.

Перечисленные методы определения деформированного состояния имеют как ряд недостатков, так и преимуществ. Методы экспериментального изучения напряженно-деформированного состояния, как правило, трудоемки и связаны с дополнительными затратами на материалы. Например, в методе вставок необходимо просверливать весь пакет многослойной композиции. Кроме того, в отверстие пластины вставляются медные вставки и их последующая утилизация затруднительна и трудозатратна. В некоторых случаях сварки (плакирования) взрывом применяют материалы с сильно различающимися механическими характеристиками по прочности (предел текучести, предел прочности, ударная вязкость, твердость) и необходимо изучение деформированного состояния с более высокой прочностью. В таком случае можно ограничиться выполнением отверстий в более жестком слое композиции.

При сварке (плакировании) взрывом материал мягкой составляющей композиции затекает в отверстия жесткого материала (рис. 2).

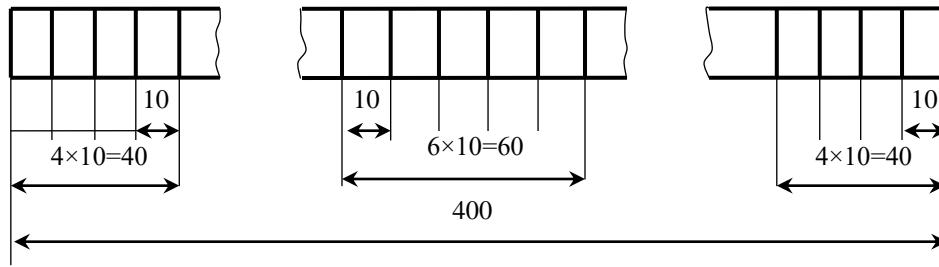


Рисунок 2 – Схема расположения отверстий в неподвижной пластине из стали 65Г (модифицированный метод вставок)

Этого вполне достаточно для определения направления и величины сдвиговых перемещений жесткого слоя металла.

Следует заметить, что методы определения напряженно-деформированного состояния материала по распределению твердости и микроструктурный основаны на существовании однозначной зависимости между твердостью и структурой деформированного металла с интенсивностью деформаций. Поэтому вполне допустимо использовать метод измерения твердости не только для оценки напряженно-деформированного состояния [8], но и оценки размеров зерна и структурного анализа.

Рассмотрены схемы сварки взрывом при иницировании заряда из центральной точки заготовки (рис. 3): а – параллельная без нависания; б – с нависанием; б\* – с нависанием, подрыв из центра пластины; б\*\* – с нависанием, полученным при помо-

щи дополнительных пластин, отлетающих при соударении (приставное фальшнависание), либо зона нависания содержит ослабление (V-образные канавки, риски, углубления); в – с фальшпластинами, так называемыми откольными элементами, которые располагают вплотную к торцам заготовки, что позволяет практически устранить деформацию торцов неподвижной пластины; в\* – использование бокового нависания (наличие концентраторов обязательно) и откольных элементов, это позволяет устранить деформацию торцов неподвижной пластины и обеспечить свариваемость в краевых зонах; г – с углублением в начале сварки, эта схема в значительной степени уменьшает деформацию переднего торца; д – с отбортовкой или с приставным фальшнависанием; схемы а, б – с использованием в качестве взрывчатого вещества ВВВ.

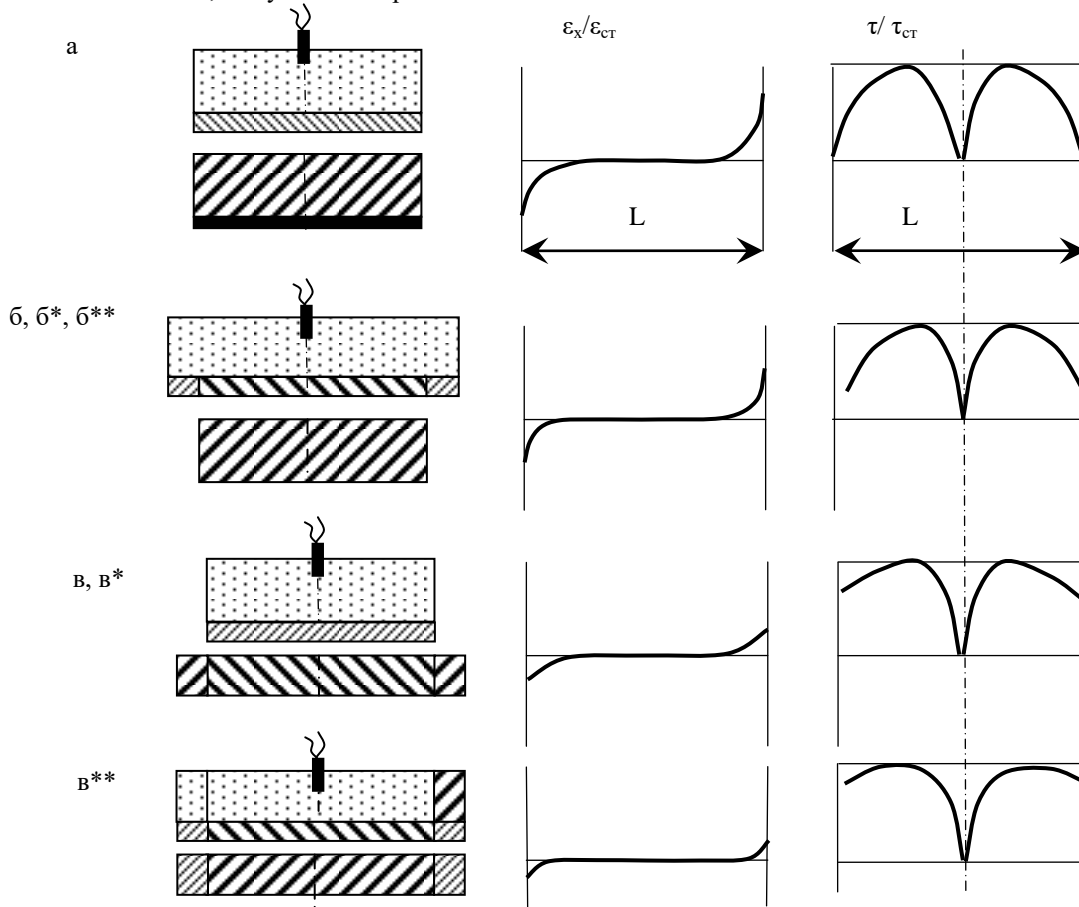


Рисунок 3 – Схемы плакирования взрывом и изменение деформаций и прочности на срез у границы соединений:  $\epsilon_x$ ,  $\tau$  – условные сдвиговые деформации и напряжения в установившихся условиях процесса;  $\epsilon_{ст}$ ,  $\tau_{ст}$  – то же в неустановившихся условиях

При реализации этих схем сварки происходит прогиб биметаллической заготовки вдоль продольной оси по направлению детонации взрывчатого вещества, а при центральном инициировании происходит небольшая проштамповка заготовки. При получении биметаллических плоских заготовок это является существенным недостатком, и необходима правка биметаллических заготовок. Тем не менее, при последующем формообразовании биметаллических заготовок начальный прогиб заготовок положительно влияет на процесс деформирования, снижая вероятность расслоения торцевых зон.

При инициировании заряда взрывчатого вещества из центральной точки образуется непровар непосредственно под детонатором. Это связано с отсутствием косоуго соударения в этой зоне и очистки поверхностей. В большинстве случаев такие непровары не регистрируются стандартной ультразвуковой дефектоскопией. При необходимости устране-

ния зоны непровара используются следующие способы. Установка боевика из взрывчатого вещества, имеющего большую скорость детонации. Поверхность метаемой заготовки деформируется по сфере, и возникает косоуго соударение. Оптимальный размер боевика из аммонита № 6ЖВ составляет 60-80 мм. По другому способу предлагается помещать под точкой инициирования заряда призмы из пластичного металла, что трудно осуществимо. Большой прочностью и меньшей неравномерностью деформаций обладают заготовки, полученные по схеме в\*.

В экспериментах в качестве метаемой пластины использовалась алюминиевая пластина толщиной 5 мм из сплава АД1-0, неподвижная пластина – из стали 65Г. В стальной пластине выполнялись отверстия.

Деформация, образовавшаяся в процессе плакирования (сварки) взрывом штифта представлена на рис. 4.



Рисунок 4 – Деформация, образовавшаяся в процессе плакированием взрывом штифта (затекание металла в отверстия)

Для упрочнения взрывом с использованием в качестве энергоносителей ВВВ целесообразно использовать схемы упрочнения плоской ударной волной при компактном взрыве и от соударения с метаемой пластиной. При этом необходимо над основным зарядом взрывчатого вещества устанавливать генератор плоской ударной волны. Более эффективно в процессах упрочнения и плакирования (сварки) взрывом применять схему упрочнения через подвижное твердое тело. В этом случае происходит соударение твердого тела с упрочняемой поверхностью и относительное перемещение твердого тела. В результате этого происходит фрикционное и ударно-импульсное воздействие на упрочняемый материал. Высокие сдвиговые контактные напряжения, возникающие при этом, приводят к формированию нанослоя в упрочняемой поверхности, что существенно повышает эксплуатационные характеристики деталей. Такой процесс можно рассматривать как импульсно-ударное упрочнение. Возможные схемы процесса представлены на рис. 5.

Дальнейшие исследования будут связаны с теоретическим описанием процесса импульсно-фрикционного упрочнения. Будут выполняться работы по разработке рекомендаций по технологии формирования зарядов из водонаполненных взрывчатых веществ. Модифицированный метод штифтов может использоваться не только для измерения и оценки деформаций плакирующего слоя, но и для получения слоистых композиций [11].

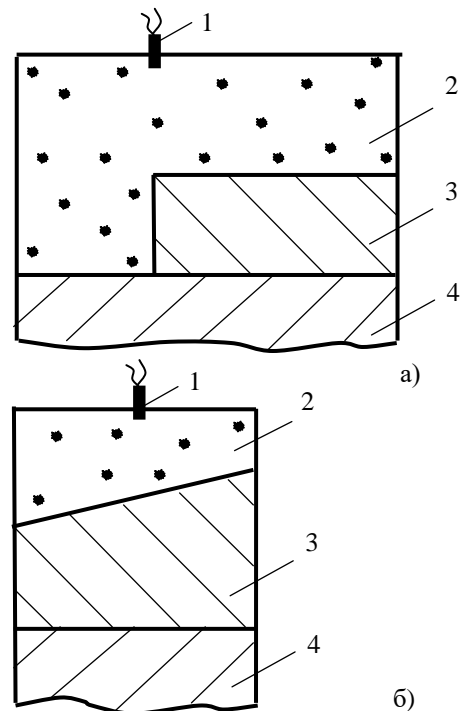


Рисунок 5 – Схема процесса упрочнения через подвижное твердое тело: а) с торцевым зарядом, б) при расположении заряда на наклонной поверхности. 1 – средство инициирования, 2 – ВВВ, 3 – подвижное твердое тело, 4 – упрочняемый материал

Не менее эффективно и применение перфорированных пластин с высокотвердым слоем в сочетании с вязким слоем. Для этого в пластинах с высокотвердым слоем выполняются отверстия диаметром менее диаметра пули. Ось отверстий может быть перпендикулярной или наклонной к внешней поверхности пластины. При совместном сжатии вязкой и твердой пластин, в частности, титана и алюминия или стали и алюминия и наложении вибрации низкой частоты на пуансон происходит затекание алюминия в отверстия и холодная сварка материалов (рис. 6).



Рисунок 6 – Перфорированная пластина из биметалла титан-алюминий, полученная совместной пластической деформацией

В результате испытаний, установлено, что баллистическая стойкость этих пластин не уступает баллистической стойкости слоистых композиций, полученных плакированием (сваркой) взрывом.

**ВЫВОДЫ.** Обоснована перспективность применения водонаполненных взрывчатых веществ в процессах импульсной металлообработки – упрочнения, плакирования, сварки и штамповки взрывом.

Водонаполненные взрывчатые вещества обладают небольшой чувствительностью к механическим и тепловым воздействиям и более безопасны.

Для компенсации низкой скорости детонации ВВВ при упрочнении взрывом целесообразно использовать схему упрочнения через подвижную промежуточную среду. Предложенная схема упрочнения обеспечивает импульсное, ударное и фрикционное нагружение, которое приводит к интенсивной пластической деформации поверхностного слоя с образованием нанокристаллической структуры.

Усовершенствован штифтовой метод оценки деформированного состояния плакирующего слоя, путем обеспечения самопроизвольного затекания более мягкого материала в отверстия менее мягкого. Затраты на эксперимент в этом случае снижаются в 2–2,5 раза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Драгобецкий В. В., Загорянский В. Г., Загирняк В. Е. Расчет режимов сварки взрывом слоистой медно-алюминиевой композиции. *Вісник Східноукраїн-*

*ського національного університету імені Володимира Даля.* Луганськ. 2012. № 13 (184). Ч. 1. С. 60–69.

2. Драгобецкий В. В., Федотьев А. Н., Луговая О. В. Разработка технологии получения монолитных кромок сваркой взрывом. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.* Кременчук. 2005. Вип. 2/2005 (31). С. 81–83.

3. Драгобецкий В. В., Цыган Б. Г., Савелов Д. В., Луговая О. В. Разработка новых технологий металлообработки путем выявления новых физических эффектов при взрывном нагружении. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.* Кременчук. 2005. Вип. 2/2005 (31). С. 47–53.

4. Лотоус В. В., Чебенко Ю. Н., Драгобецкий В. В. Перспективные технологии обработки деталей горного оборудования. *Стратегія якості в промисловості та освіті: матеріали ІХ Міжнародної конференції (Болгарія, Варна, 31 травня – 7 червня 2013 р).* Варна: Технічний університет, 2013. С. 78–80.

5. Лотоус В. В., Драгобецкий В. В., Наумова Е. А. Поиск новых возможностей повышения износостойкости деталей горного оборудования. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудування та металургії: матеріали ІХ Міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 22-24 листопада 2017 р.).* Харків: НТУУ «ХПІ», 2017. С. 46-47.

6. Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V. (2000). Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science.* 2000. Vol. 45. P. 103–189.

7. Dragobetskii V. V., Shapoval A. A., Zagoryanskii V. G. (2015). Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions. *Steel in Translation.* Vol. 45. No. 1. P. 33–37.

8. Огородников В. А., Киселев В. Б., Сивак И. О. Энергия. Деформации. Разрушение: монография. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 204 с.

9. Драгобецкий В. В., Пирогов Д. Л., Наумова Е. А., Елисеев В. И. Выбор методики определения энергии разрушения хрупких и пластичных материалов. *Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва.* Кременчук. 2008. Вип. 1/2008 (1). С. 34–38.

10. Борисевич В. К., Драгобецкий В. В., Троцко О. В. Многофакторность физических явлений при взрывной металлообработке. *Авиационно-космическая техника и технология.* Харьков. 2007. № 11. С. 62–72.

11. Zagirnyak M. V., Dragobetskyi V. V. (2015). New Methods of Obtaining Materials and Structures for Light Armor Protection. *International Conference on Military Technologies (ICMT).* (Brno, University of Defence, 2015). P. 709-710.

**REDUCING THE EDGE EFFECT WHEN USING WATERFILLED EXPLOSIVES IN THE PROCESSES OF BLASTING AND HARDENING BY EXPLOSION**

**V. Zagoryansky, V. Dragobetskii, V. Shchetinin, V. Chebenko**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: zagor\_vlad@ukr.net

**Purpose.** The aim of this work is to assess the prospects of using water-filled explosives for pulsed metalworking processes - stamping, cladding, welding and hardening by explosion. The solution to the use of explosives with a low detonation velocity in the process of hardening by explosion. **Methodology.** To solve this problem, the authors conducted a detailed study of scientific and technical information on the use of water-filled explosives and the study of their properties. Edge effects when using water-filled explosives were studied experimentally using the modified insert method. Improvement of the insertion method was achieved in the study of joint plastic deformation and cladding (welding) by the explosion of perforated and billets with holes. **Results.** The prospects of using water-filled explosives in pulsed metal processing technologies have been established. Edge effects when using explosives are associated with lateral expansion, the curvature of flat parts, the stability of properties over the entire area of the welded joint or hardened surface is several times less than when using bulk explosives. A new technological scheme for hardening by explosion using explosives is proposed. **Originality.** A modified method for assessing deformations of the cladding layer has been developed, providing spontaneous flow of softer material into a harder one. A new technological scheme of hardening is proposed - pulse-friction processing. The scheme provides intensive plastic deformation of the hardened surface layer in combination with shock-wave loading. **Practical value.** The possibility and expediency of the use of water-filled explosives instead of powdered ones are substantiated. At the same time, production costs are reduced and blasting safety is increased. In addition, the practical exclusion of edge effects when using explosives leads to a minimum of finishing work (dressing, trimming) during explosion welding and an even distribution of mechanical characteristics over the volume processed during stamping and hardening by explosion.

**Keywords:** pulsed metalworking processes, water-filled explosives, nanomaterials, friction hardening, edge effect, insertion method.

REFERENCES

1. Dragobetskii, V. V., Zagoryanskiy, V. G., Zagirnyak V. Ye. (2012), "Raschet rezhimov svarki vzryvom sloistoy medno-alyuminiyevoy kompozitsii" [Calculation of explosion welding modes of a layered copper-aluminum composition], *Visnyk Skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya* [Bulletin of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University], № 13 (184), Part.1, pp. 60–69.
2. Dragobetskii, V. V., Fedot'yev, A. N., Lugo-vaya, O. V. (2005), "Razrabotka tekhnologii polucheniya monolitnykh kromok svarkoy vzryvom" [Development of technology for producing monolithic edges by explosion welding], *Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu*, [Bulletin of Kremenchug State Polytechnic University], vol. 2/2005 (31), pp. 81–83.
3. Dragobetskii, V. V., Tsygan, B. G., Savelov, D. V., Lugo-vaya, O. V. (2005), "Razrabotka novykh tekhnologiy metalloobrabotki putem vyyavleniya novykh fizicheskikh effektov pri vzryvnom nagrauzhenii" [Development of new metalworking technologies by identifying new physical effects under explosive loading]. *Visnyk Kremenchuts'koho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Kremenchug State Polytechnic University], vol. 2/2005 (31), pp. 47–53.
4. Lotous, V. V., Chebenko, Yu. N., Dragobetskii, V. V. (2013) "Perspektivnyye tekhnologii obrabotki detaley gornogo oborudovaniya" [Advanced technologies for processing parts of mining equipment], *Stratehiya yakosti v promyslovosti ta osviti* [Quality strategy in industry and education], Varna: Technical University, pp. 78–80.
5. Lotous, V. V., Dragobetskii, V. V., Naumova, Ye. A. (2017), "Poisk novykh vozmozhnostey povysheniya iznosostoykosti detaley gornogo oborudovaniya" [Search for new opportunities to increase the wear resistance of mining equipment parts], *Resursozberezhennya ta enerhoefektyvnist' protsesiv i obladnannya obrobky tyskom u mashynobuduvannya ta metalurhiyi* [Resource saving and energy efficiency of pressure treatment processes and equipment in mechanical engineering and metallurgy], Kharkiv, pp. 46–47.
6. Valiev, R. Z., Islamgaliev, R. K., Alexandrov, I. V. (2000), Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, vol. 45, pp. 103–189.
7. Dragobetskii, V. V., Shapoval, A. A., Zagoryanskiy, V. G. (2015), Development of Elements of Personal Protective Equipment of New Generation on the Basis of Layered Metal Compositions, *Steel in Translation*, vol. 45, No. 1, pp. 33–37.
8. Ogorodnikov, V. A., Kiselev, V. B., Sivak, I. O. (2005), "Energiya. Deformatsii. Razrusheniye" [Energy. Deformations. Destruction], UNIVERSUM-Vinnytsya, 204 p.
9. Dragobetskii, V. V., Pirogov, D. L., Naumova, E. A., Yeliseyev, V. I. (2008), "Vybor metodiki opredeleniya energii razrusheniya khрупkikh i plastichnykh materialov" [Choice of a method for determining the fracture energy of brittle and plastic materials], *Suchasni resursoenerhozberihayuchi tekhnolohiyi hirnychoho vyrobnytstva* [Modern resource-saving technologies of mining production], vol. 1/2008 (1), pp. 34–38.
10. Borisevich, V. K., Dragobetskii, V. V., Trotsko, O. V. (2007), "Mnogofaktornost' fizicheskikh yavleniy pri vzryvnoy metalloobrabotke" [Multifactorial nature of physical phenomena during explosive metal working], *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace engineering and technology], № 11, pp. 62–72.
11. Zagirnyak, M. V., Dragobetskii, V. V. (2015), New Methods of Obtaining Materials and Structures for Light Armor Protection, *International Conference on Military Technologies (ICMT)*, Brno, pp. 709-710.

Стаття надійшла 10.04.2020.