

**В.Н. КОВАЛЕВСКИЙ**, д-р техн. наук,  
**Г.М. СЕНЧЕНКО**, канд. техн. наук (БНТУ)

## **ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ**

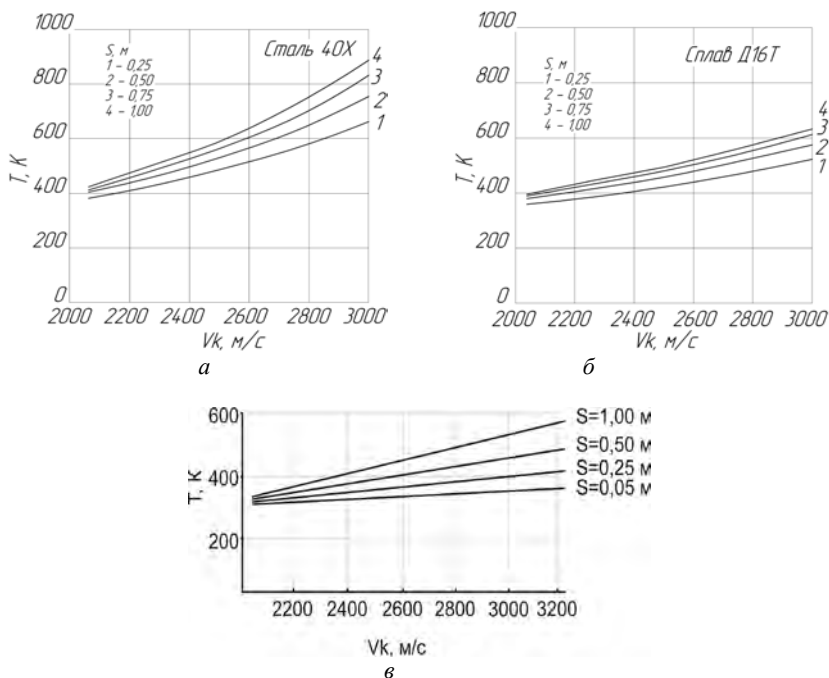
В современных отраслях промышленности большое значение имеют недорогие конструкционные материалы с высокой удельной прочностью и специфическими (триботехническими) свойствами, которые позволяют снизить вес готового изделия, уменьшить энергопотребление, повысить эксплуатационные характеристики, расширить их технические возможности. Однокомпонентный материал с указанными свойствами получить очень сложно. Одним из вариантов решения такой задачи может быть применение композиционных материалов (КМ), например, на основе углеродистой стали и сплавов цветных металлов, полученных методом сварки взрывом (СВ).

В качестве компонентов КМ интерес представляют: для конструкционных материалов – сталь 40Х и дюралюминиевый сплав Д16 (высокая конструкционная прочность и малый удельный вес); для триботехнических материалов – сталь 45 и антифрикционная бронза, сочетающие в себе прочность, низкий коэффициент трения и высокую износостойкость.

Доказано [1–3], что при изготовлении слоистых КМ методом сварки взрывом газ, находящийся в сварочном зазоре, оказывает существенное тепловое воздействие на свариваемые материалы. При схлопывании свариваемых заготовок впереди точки контакта образуется область ударно-сжатого газа, температура которого в диапазоне применяемых скоростей сварки (2000–3200 м/с) может достигать 4600 К, а время действия – 100 мкс [4]. При таких условиях тепловой поток из газа в металл может привести к оплавлению поверхностных слоев, что в дальнейшем сказывается на процессе образования и качестве сварного соединения, особенно при сварке цветных металлов и сплавов с низкой температурой плавления.

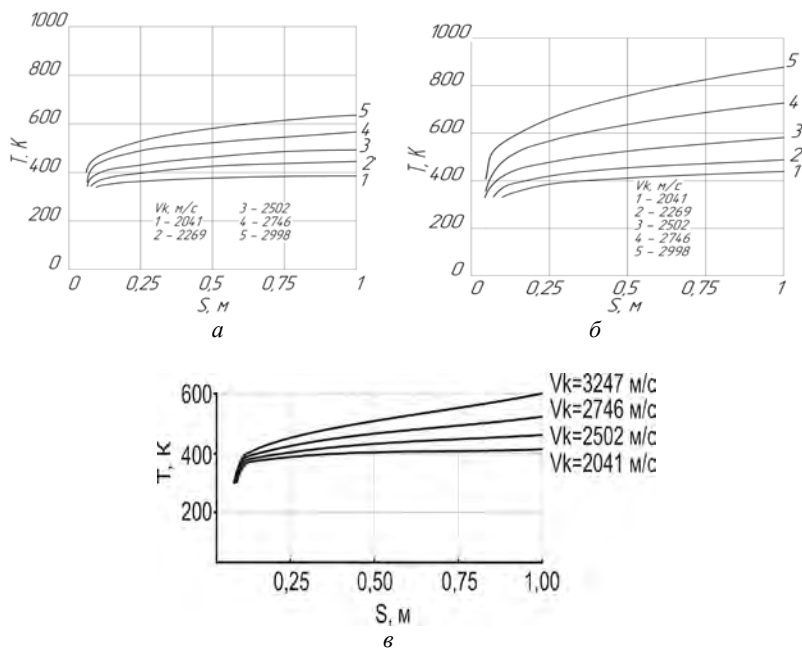
Проведенные исследования по определению температуры ударно-сжатого газа [4] показали хорошую сходимость экспериментальных значений с теоретическими данными, полученными в работе [5], что позволяет с погрешностью 7 % применять последние при расчете температур свариваемых материалов. Данное положение принято в основу методики расчета температуры свариваемых материалов от действия ударно-сжатого газа в сварочном зазоре и определения ее значений по специально разработанной программе [6] в зависимости от скорости точки контакта, длины свариваемых заготовок и шероховатости поверхности материалов.

На рисунках 1–3 представлены результаты расчетов температуры стали 40Х, сплава Д16 и меди М1 от действия ударно-сжатого воздуха.



а – сплав Д16Т; б – сталь 40Х; в – медь М1

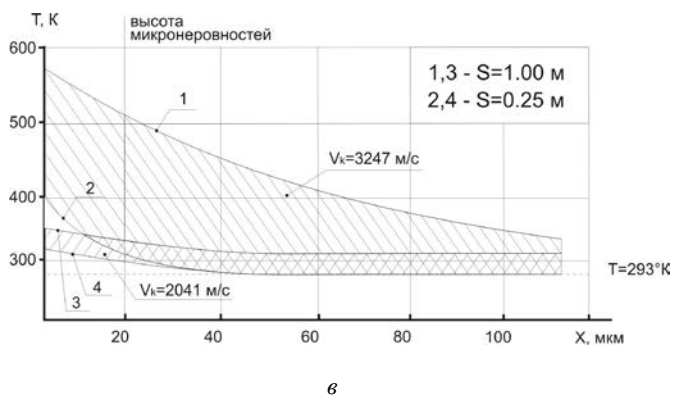
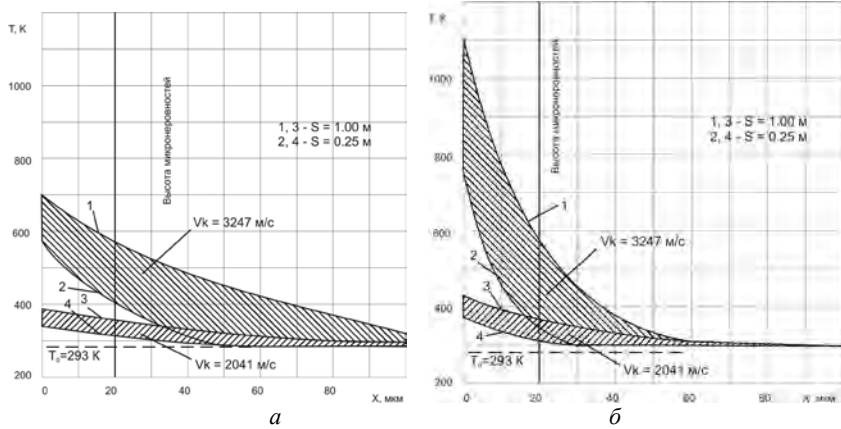
Рисунок 1 – Температура на поверхности материалов (шероховатость 20 мкм) в зависимости от скорости точки контакта



*a* – сплав Д16Т; *б* – сталь 40Х; *в* – медь М1

Рисунок 2 – Температура на поверхности материалов (шероховатость 20 мкм) в зависимости от длины свариваемых заготовок

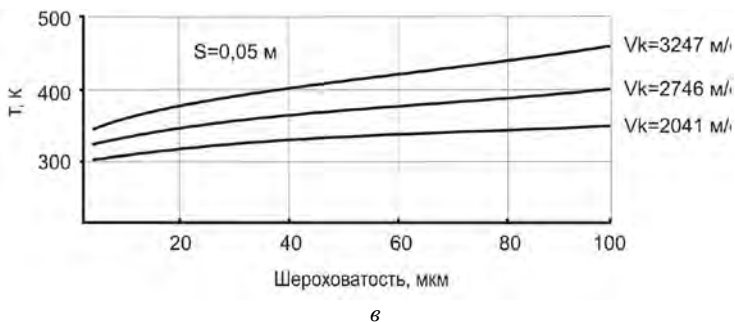
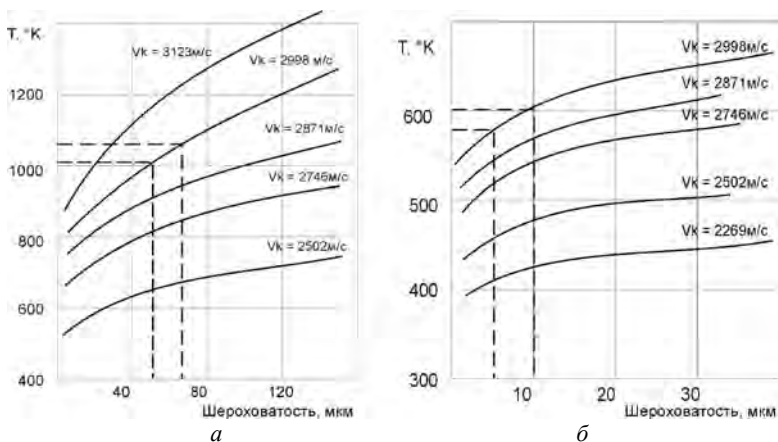
На свариваемой поверхности самая высокая температура у стали 40Х, затем у сплава Д16Т и самая низкая у меди М1. И разница тем значительнее, чем выше скорость точки контакта (рисунок 1) и длиннее свариваемые заготовки (рисунок 2). Но по сечению сплав Д16Т и медь М1 прогреваются на большую глубину чем сталь 40Х (рисунок 3), что связано с большим коэффициентом теплопроводности цветных сплавов. Следует отметить, что скорость точки контакта оказывает большее влияние на температуру материалов, чем длина свариваемых заготовок. Но при скоростях, используемых для СВ (2000–3200 м/с), ни один из материалов (сталь 40Х, сталь 45, сплав Д16, медь М1) не нагревается до температуры плавления. Исключение составляют оловянно-свинцовистые бронзы с легкоплавкими легирующими элементами, влияние ударно-сжатого воздуха на которые будет рассмотрено ниже.



*а* – сплав Д16Т; *б* – сталь 40Х; *в* – медь М1

Рисунок 3 – Распределение температуры по сечению (*x*, мм) свариваемых материалов

Влияние шероховатости на температуру материалов представлено на рисунке 4. С увеличением шероховатости температура материалов растет и тем интенсивнее, чем выше скорость точки контакта. Наибольшее влияние на температуру сказывается при малых значениях шероховатости: для стали 40Х – до 20 мкм, для сплава Д16Т и меди М1 – до 10 мкм.



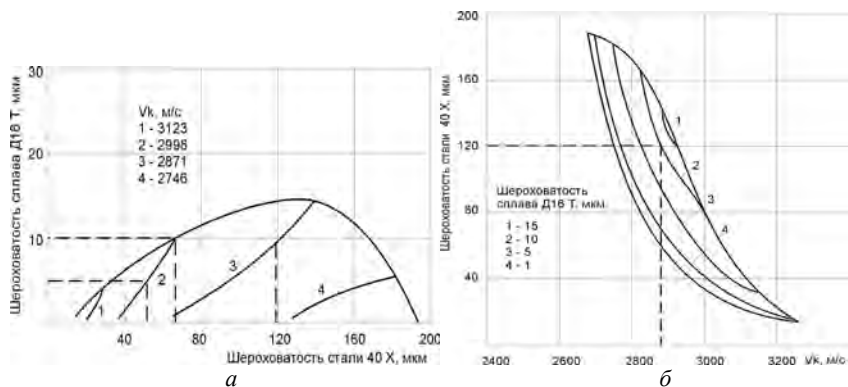
*а* – сталь 40X; *б* – сплав Д16Т; *в* – медь М1

Рисунок 4 – Влияние шероховатости материалов на их температуру при воздействии ударно-сжатого воздуха

Неодинаковый нагрев исследуемых материалов от действия ударно-сжатого воздуха, влияние на их температуру скорости точки контакта и шероховатости поверхности создают условия для подбора режимов СВ, при которых свариваемые заготовки к моменту соударения будут иметь одинаковую прочность (твердость или пластичность), что обеспечивает равномерное перемешивание приконтактных слоев и повышает качество сварного соединения.

На рисунке 5 представлена область СВ стали 40X и сплава Д16Т в зависимости от шероховатости поверхности свариваемых матери-

алов из условия их равнопрочного состояния к моменту соударения.



а – в зависимости от шероховатости стали 40X; б – в зависимости от скорости точки контакта

Рисунок 5 – Область сварки взрывом стали 40X и сплава Д16Т

Приведенные расчеты справедливы для длины свариваемых заготовок  $S = 1$  м. Аналогичные диаграммы можно построить для любой длины  $S$ . С уменьшением  $S$  область сварки будет сужаться и смещаться к началу координат. Для создания одинаковых условий СВ на протяжении всей длины свариваемых заготовок (с заданной шероховатостью) необходимо изменять по длине в пределах границ сварки скорость точки контакта  $V_k$ .

В качестве исходной принята шероховатость сплава Д16Т  $x_{(Д16Т)} = 5$  мкм. При таких значениях  $x_{(Д16Т)}$  создаются наиболее широкие возможности для варьирования  $V_k$  и  $x_{(40X)}$  (рисунок 5). Используя полученные графики зависимостей между  $V_k$ ,  $S$ ,  $x_{(40X)}$  (рисунок 6), а также известные зависимости скорости точки контакта от высоты заряда взрывчатого вещества (ВВ) и процентного содержания инертной добавки [7], получена диаграмма для выбора шероховатости стали 40X и высоты заряда ВВ по длине свариваемых заготовок (рисунок 7).

Высота заряда ВВ имеет прямо пропорциональную зависимость от длины заготовок и угол подъема прямой тем больше, чем выше процентное содержание инертной добавки.

Приведенных диаграмм и графиков достаточно для определения оптимальных технологических параметров сварки (с учетом шероховатости поверхности свариваемых материалов) для получения качественного сварного соединения «сталь 40Х-сплав Д16Т».

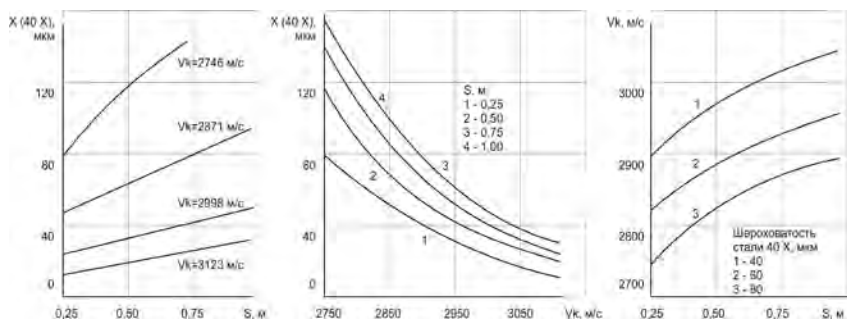


Рисунок 6 – Графики зависимости между  $V_k$ ,  $S$  и  $x_{(40X)}$  при  $x_{(Д16Т)} = 5$  мкм

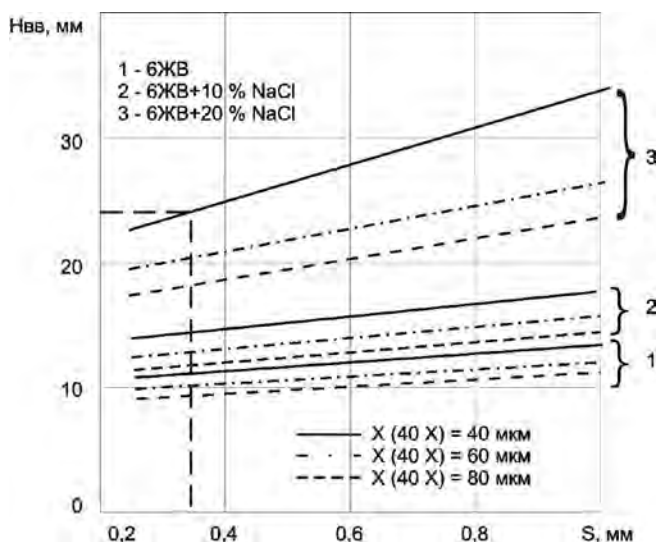


Рисунок 7 – Расчетная величина высоты заряда ВВ в зависимости от длины свариваемых заготовок (сталь 40Х и сплав Д16Т)

Сварка взрывом углеродистой стали с антифрикционными бронзами сопряжена с трудностями, связанными с наличием в составе бронз легкоплавких легирующих элементов (свинец, олово). На рисунке 8 представлена температура бронзы от действия ударно-сжатого воздуха в зависимости от шероховатости поверхности, длины свариваемых заготовок и скорости точки контакта. Как видно, при  $V_k = 2998$  м/с температура поверхности бронзы находится на уровне температуры плавления олова и свинца. Учитывая дополнительное выделение теплоты при соударении свариваемых заготовок, появление расплавов в зоне сварки, получить качественный КМ «сталь – антифрикционная бронза» методом СВ практически невозможно.

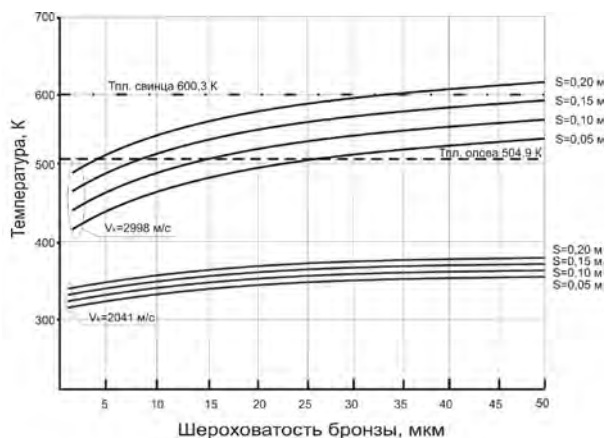


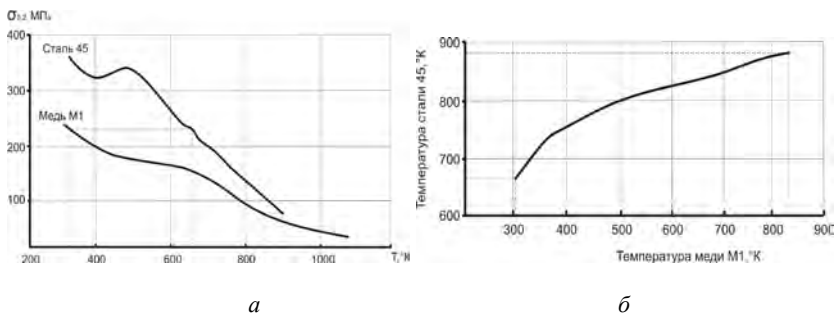
Рисунок 8 – Влияние шероховатости бронзы на ее температуру при воздействии ударно-сжатого воздуха в процессе СВ

Одним из вариантов решения проблемы является осуществление процесса СВ через промежуточные прослойки, например, медь М1. Сварку взрывом меди с антифрикционной бронзой можно осуществлять на более «мягких» режимах с меньшими скоростями точки контакта. Как видно из рисунка 8, при  $V_k = 2041$  м/с температура бронзы от действия ударно-сжатого воздуха не достигает точек плавления олова и свинца, что дает предпосылки для получения



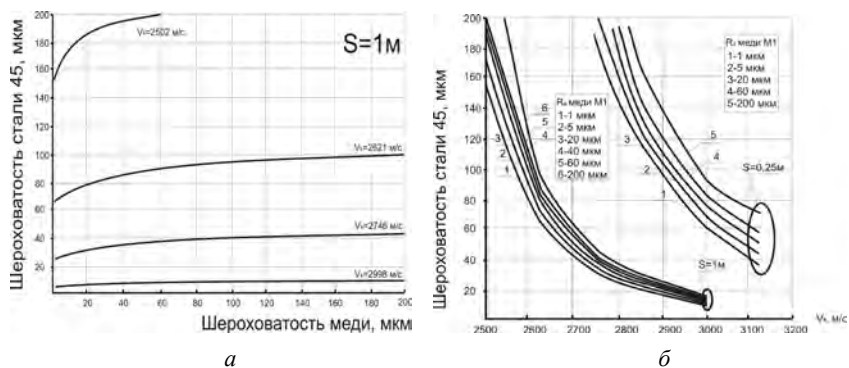
сварного соединения «медь М1 – антифрикционная бронза». Однако тепловое воздействие ударно-сжатого воздуха в сварочном зазоре в сочетании с контактным взаимодействием свариваемых материалов с высокой степенью пластической деформации в процессе СВ все-таки приводят к плавлению включений свинца и их выносу впереди точки контакта. При этом протяженность чешуек свинца в зоне сварного шва может достигать 20–30 % длины зоны соединения и тем самым снижать прочность на отрыв КМ «медь М1 – антифрикционная бронза» до 75 МПа [8]. Для повышения прочности сварного соединения «медь-бронза» поверхность бронзовой заготовки можно плакировать медной прослойкой не с помощью СВ, а методами порошковой металлургии [8]. В этом случае методом сварки взрывом достаточно получить КМ на основании стали 45 и меди М1, входящих в состав многослойной антифрикционной заготовки «сталь 45 – медь М1 – антифрикционная бронза».

На рисунке 9 представлена диаграмма определения температуры стали 45 в зависимости от температуры меди М1 исходя из условия совпадения предела текучести материалов, на основании чего определена область СВ стали 45 и меди М1 с точки зрения их одинаковой прочности к моменту соударения (рисунок 10).



*а* – предел текучести в зависимости от температуры материалов; *б* – расчетная температура стали 45 в зависимости от температуры меди М1

Рисунок 9 – К определению области сварки взрывом стали 45 и меди М1



а – в зависимости от шероховатости поверхности меди M1; б – в зависимости от скорости точки контакта

Рисунок 10 – Область сварки взрывом стали 45 и меди M1

В отличие от пары «сталь 40X – сплав Д16Т» область СВ стали 45 и меди M1 в координатах «шероховатость поверхности меди M1 – шероховатость поверхности стали 45» не имеет ярко выраженного характера (рисунок 10, а). Ввиду незначительной зависимости прочностных характеристик меди M1 от температуры (рисунок 9, а) снижается влияние шероховатости поверхности меди M1 на шероховатость поверхности стали 45, при которой возможна сварка материалов в равнопрочном состоянии. При шероховатости поверхности меди M1 до 200 мкм (после механической обработки) в диапазоне скоростей 2500–3000 м/с можно определить шероховатость стали 45 для достижения указанных условий сварки. Как видно из рисунка 10, б, с увеличением длины свариваемых заготовок нивелируется влияние шероховатости поверхности меди M1, но при этом растет диапазон варьирования шероховатостью поверхности стали 45 и скоростью точки контакта. В данной ситуации шероховатость свариваемых материалов не является регламентирующим параметром, а только способствует достижению хорошего качества сварки.

## Литература

**1. К вопросу** о теории процесса сварки труб взрывом / В.Н. Ковалевский [и др.] // Сварка и родственные технологии: сб. науч. тр. – Минск, 2001. – Вып. 4. – С. 37–39.

**2. Ишуткин, С.Н.** Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин / С.Н. Ишуткин, В.И. Кирко, Н.И. Пак // Физика горения и взрыва. – 1981. – Т. 17, № 6. – С. 151–153.

**3. Ишуткин, С.Н.** Исследование теплового воздействия ударно-сжатого газа на поверхность соударяющихся пластин / С.Н. Ишуткин, В.И. Кирко, В.А. Симонов // Физика горения и взрыва. – 1980. – Т. 16, № 6. – С. 69–73.

**4. Сенченко, Г.М.** Определение температуры ударно-сжатого газа при сварке взрывом / Г. М. Сенченко // Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2009. – Вып. 32. – С. 270–285.

**5. Физика** взрыва / Ф.А. Баум [и др.]; под ред. К.П. Станюковича. – 2-е перераб. изд. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

**6. Ковалевский, В.Н.** Определение области сварки взрывом стали 40Х и сплава Д16 / В.Н. Ковалевский, Г.М. Сенченко // Сварка и родственные технологии: сб. науч. тр. – Минск, 2002. – Вып. 5. – С. 45–48.

**7. Разработка** и исследование технологии изготовления биметаллических труб, плакированных кобальтовым и ниобиевым сплавами методами импульсного нагружения: отчет о НИР (заключит.) / Белорус. политехн. ин-т; руководитель В.Н. Ковалевский. – Минск, 1987. – № ГР 01860033204.

**8. Исследовать**, разработать и внедрить технологию изготовления сваркой взрывом сложнопрофильных заготовок многослойных антифрикционных материалов на основе спеченных композиций для узлов трения гидравлических машин. Провести модернизацию участка на опытном производстве НИИ ИП с ОП и изготовить опытную партию сложнопрофильных заготовок многослойных антифрикционных материалов в кол. 1500 шт.: отчет о НИР (заключит.) / Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством; руководитель Р.В. Стефанович. – Минск, 2003. – № ГР 20011647.