



КОМПЛЕКСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МНОГОЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ю. П. ТРЫКОВ, д-р техн. наук, Л. М. ГУРЕВИЧ, канд. техн. наук, В. Г. ШМОРГУН, д-р техн. наук
(Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Описан многолетний опыт разработки комплексных технологий получения нового класса конструкционных материалов (слоистых композитов) с уникальным сочетанием жаропрочных и теплофизических свойств, включающих сварку взрывом для получения биметаллических и многослойных материалов в сочетании с родственными технологиями (различные виды термообработки и обработки давлением).

Ключевые слова: комплексные технологии, сварка взрывом, горячая исходная прокатка, термообработка, слоистые композиты

В статье приведены решаемые в последние годы кафедрой материаловедения и композиционных материалов ВолГТУ материаловедческие задачи по созданию нового класса конструкционных материалов — слоистых композитов (СК) с уникальным сочетанием жаропрочных и теплофизических свойств. Достигнутые успехи базируются на накопленном научно-технологическом опыте в использовании сварки взрывом (СВ) для получения биметаллических и многослойных соединений и материалов из трудносвариваемых металлов и сплавов (Ti–Fe, Cu–Al, Ti–Al, Mg–Al и др.) в сочетании с родственными технологиями (различные виды термической обработки (ТО) и обработки давлением). При разработке энергетических и металлофизических представлений о кинетике формирования соединения при СВ и структурных изменениях при последующих технологических переделах [1–3], ставших научной основой проектирования конструкции и технологии изготовления СК, решены следующие задачи:

1) определены перспективные системы и сочетания разнородных металлов и сплавов, образующие при термомеханическом взаимодействии в различном агрегатном состоянии высокотвердые интерметаллидные соединения;

2) усовершенствованы ранее предложенные и разработаны новые комплексные технологические процессы [4] получения на универсальном оборудовании машиностроительных и металлургических предприятий крупногабаритных заготовок многослойных интерметаллидных композитов с заданными жаропрочными, теплофизическими, износостойкими и специальными свойствами, включающие СВ, горячую или холодную прокатку (Пр), и специальные виды ТО в твердом сос-

тоянии, выше температур плавления легкоплавких слоев композита или образующихся в зоне контакта эвтектик;

3) разработаны расчетно-экспериментальные методы определения оптимальных технологических параметров применяемых операций (СВ, Пр, ТО) [5–12], позволяющие научно обоснованно назначать на этапе проектирования требуемые количество и толщины слоев исходных разнородных металлов, обеспечивать необходимое качество многослойных заготовок, сваренных взрывом, осуществлять последующие технологические переделы получения листовых композитов с расчетным объемным содержанием интерметаллидных слоев. На основе обобщения результатов научных исследований сформулированы принципиальные положения, касающиеся формирования структуры и свойств СК на различных стадиях комплексных технологий:

— при упругопластическом деформировании свариваемых взрывом СК в области малых деформаций формируются локальные зоны разупрочнения по дислокационному механизму [2];

— энергетические условия СВ влияют на процессы формирования структурной, фазовой и химической неоднородности при реактивной диффузии в твердом состоянии: возрастание энергии пластической деформации на границе соединения W_2 приводит к снижению латентного периода и увеличению скорости роста толщины диффузионной зоны [4];

— полученные уравнения [4] кинетики роста диффузионных слоев в твердофазном состоянии с учетом энергии W_2 для перспективных систем и сочетаний разнородных металлов и сплавов позволяют при создании СК назначать оптимальные параметры нагревов, обеспечивающие реализацию требуемого соотношения основных и интерметаллидных слоев, и определять режимы рекристаллизационного отжига, исключая образование «опасных» диффузионных прослоек;

— формирование структуры и фазового состава интерметаллидных слоев при температурах выше точки плавления наиболее легкоплавкого слоя СК происходит в три основные стадии, условно названные «начальной», «роста» и «насыщения» (рис. 1). Стадийность процессов взаимодействия титана с расплавом алюминия в титано-алюминиевых композитах можно объяснить наличием на границе соединения оксидных слоев с разрывами, образовавшимися в процессе прокатки из-за разной пластичности оксида и металла и последующей ТО за счет различия коэффициентов линейного расширения оксидов и металла [13];

— металлографический и рентгеноструктурный анализы показали, что диффузионные зоны СК имеют многослойное строение, зависящее в основном от температурно-временных условий нагревов [2–4]; получены обобщенные данные о влиянии режимов СВ и ТО на формирование и перераспределение элементов тонкой структуры (напряжений второго рода, параметров кристаллической решетки) в околошовной зоне СК [4]. Показана принципиальная возможность получения трех вариантов строения интерметаллидных слоев: непрерывные прослойки, образующиеся при ТО ниже температуры плавления исходных слоев композита и возникающих структурных составляющих (рис. 2, а); слои, состоящие из эвтектики и кристаллов интерметаллидов, образующиеся при контактном плавлении (рис. 2, б); слои из дисперсных интерметаллидов с прослой-

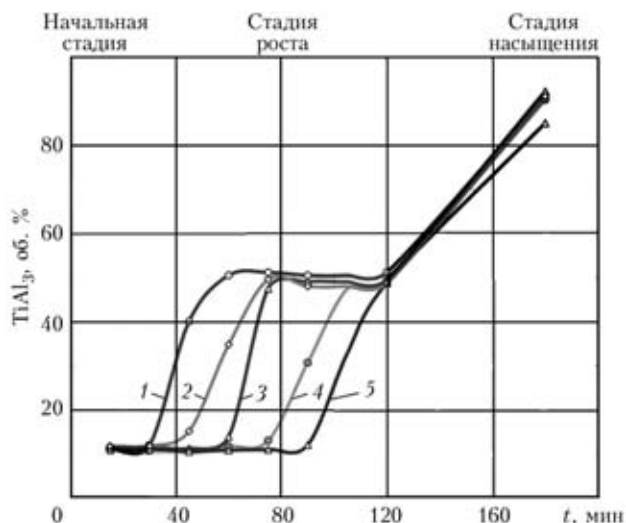


Рис. 1. Зависимость изменения объемного содержания интерметаллидов в композите ВТ1-0+АД1 (толщина АД1 0,4 мм) при 750 °С на различном удалении от границы с титаном: 1 — 0...100; 2 — 100...200; 3 — 200...300; 4 — 300...400; 5 — 400...500 мкм

ками твердых растворов, образующиеся при температурах выше температуры плавления легкоплавких слоев композита (рис. 2, в);

4) исследована кратковременная прочность при высокотемпературных испытаниях на растяжение СК (систем медь–алюминий, титан–сталь и титан–алюминий [13–15]. Анализ полученных результатов показал, что температурная зависимость механических свойств СК определяется объемной долей интерметаллидной составляющей

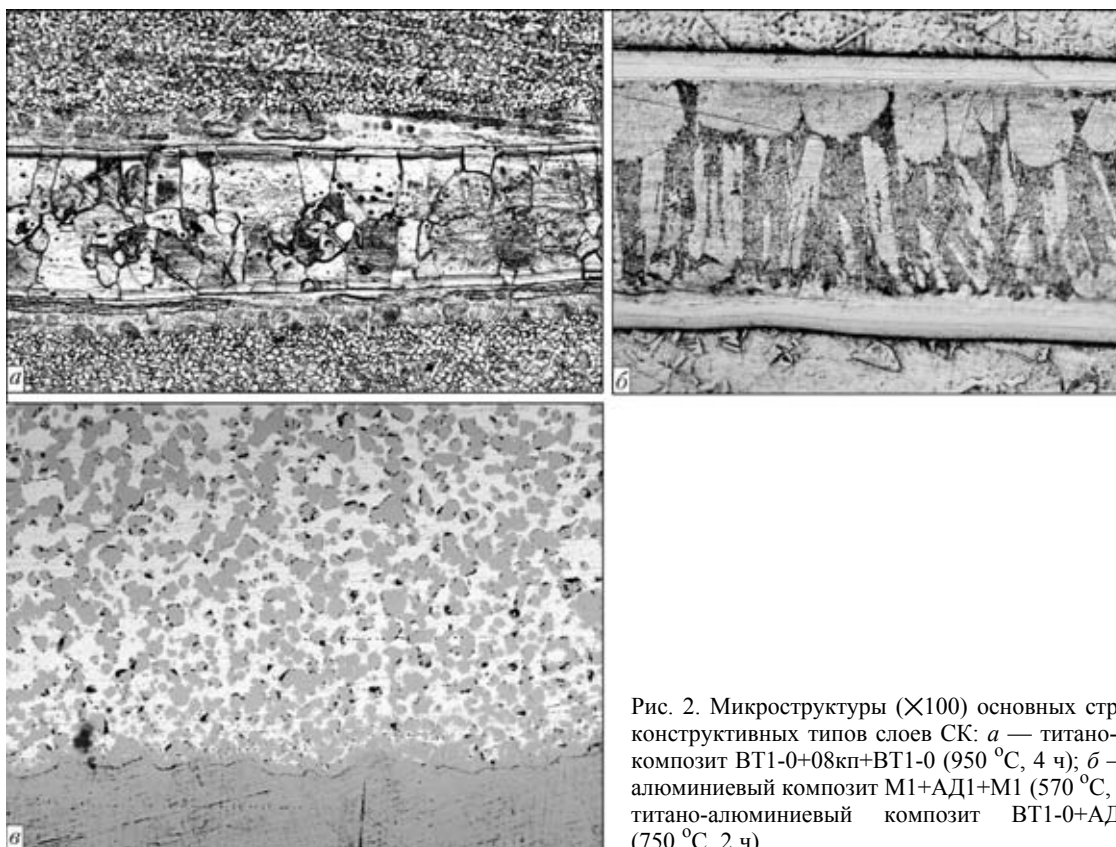


Рис. 2. Микроструктуры (×100) основных структурно-конструктивных типов слоев СК: а — титано-стальной композит ВТ1-0+08кп+ВТ1-0 (950 °С, 4 ч); б — медно-алюминиевый композит М1+АД1+М1 (570 °С, 5 ч); в — титано-алюминиевый композит ВТ1-0+АД1+ВТ1-0 (750 °С, 2 ч)

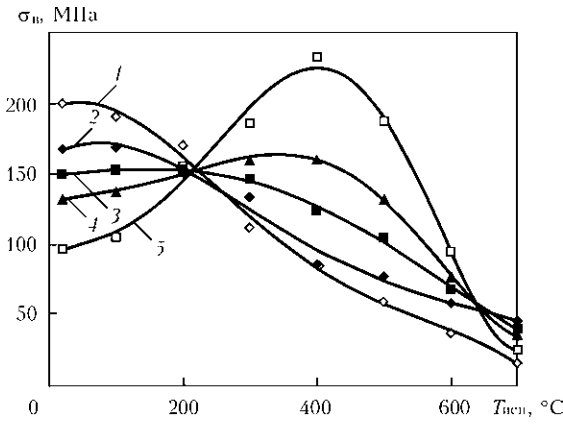


Рис. 3. Экспериментальная (1) и расчетные (2–5) зависимости предела прочности от температуры испытаний при растяжении меди (1) и медно-алюминиевого СК с $V_{инт} = 10$ (2), 20 (3), 30 (4) 50 (5) %

и позволил разделить СК на две группы. К первой отнесены композиты, прочность которых с повышением температуры испытания постепенно снижается. Объемная доля интерметаллидной составляющей $V_{инт}$ в них невысока, ее увеличение сопровождается понижением прочности и относительного удлинения. Ко второй относятся композиты с высокой объемной долей интерметаллида, прочность которых с увеличением температуры повышается, достигает максимального значения, а затем снижается. Созданные модели, описывающие прочность СК, показали, что использование СК системы медь–алюминий (рис. 3, 4) при температуре ниже 200 °C нерационально, так как их прочность ниже прочности меди. Для обеспечения высоких значений σ_b в интервале температур 200...600 °C объемная доля интерметаллидов должна быть не менее 30 %. Титано-стальные СК (рис. 5, 6) нерационально использовать при температурах ниже 400 °C, при этом минимальное объемное содержание интерметаллидов составляет 50 %;

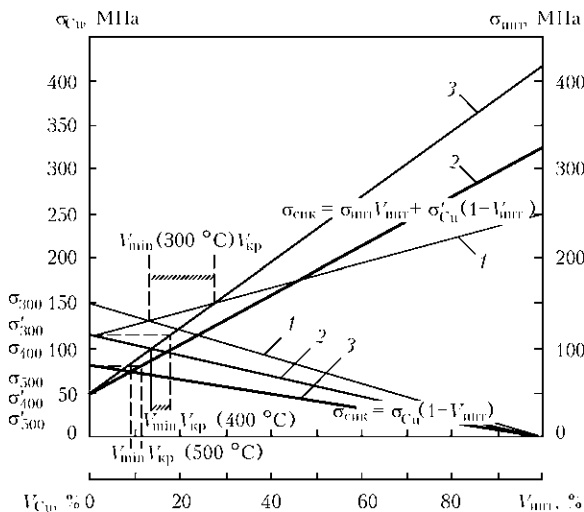


Рис. 4. Теоретическая зависимость прочности медно-алюминиевого СК от объемной доли интерметаллидной прослойки при разной температуре: 1 — 300; 2 — 400; 3 — 500 °C

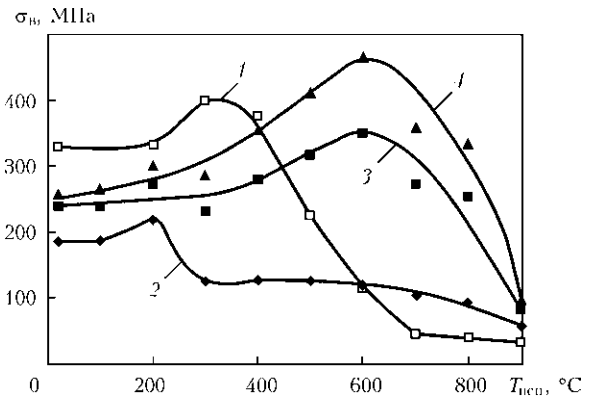


Рис. 5. Экспериментальная (1) и расчетные (2–5) зависимости предела прочности от температуры испытаний при растяжении стали 08кп (1) и титано-стального СК с $V_{инт} = 10$ (2), 50 (3) и 70 (4) %

5) благодаря исследованиям теплофизических характеристик слоистых интерметаллидных композитов определены коэффициенты теплопроводности трех основных типов интерметаллидных слоев, формирующихся в перспективных сочетаниях разнородных металлов и сплавов, и разработаны методы прогнозирования теплопроводности СК с различными структурно-конструктивными характеристиками.

Эксплуатационные и конструктивные особенности энергетического и криогенного оборудования обусловили необходимость разработки технологических процессов получения четырех видов конструкционных и функциональных СК, характеризующихся требуемыми жаропрочными, теплофизическими, коррозионными и другими специальными свойствами, максимальные габариты которых определяются техническими возможностями термического и прокатного оборудования существующих металлургических и машиностроительных предприятий:

— многослойные листы с чередующимися основными и интерметаллидными слоями толщиной каждого свыше 0,03 мм, изготавливаемые с по-

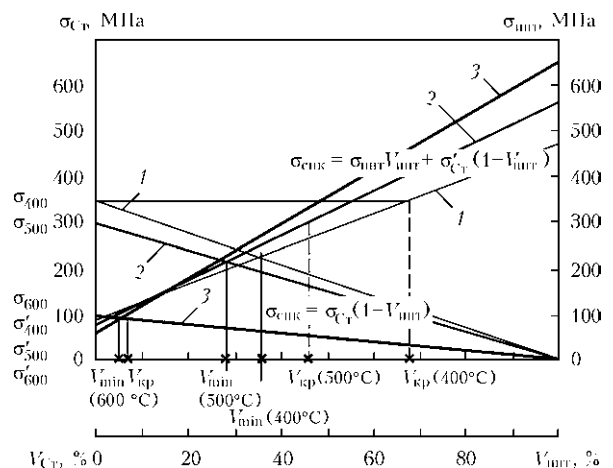


Рис. 6. Теоретическая зависимость прочности титано-стального СК от объемной доли интерметаллидной прослойки при разной температуре: 1 — 400; 2 — 500; 3 — 600 °C

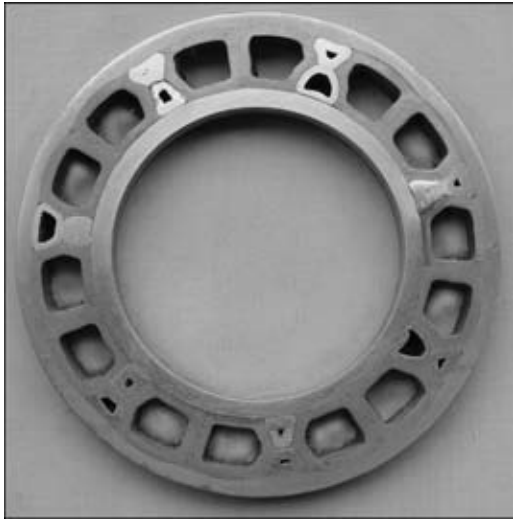


Рис. 7. Внешний вид цилиндрического композиционного многоканального теплообменника

мощью комплексной технологии, которая включает одновременную или последовательную СВ до 30 и более пластин из разнородных металлов и сплавов с параметрами, гарантирующими реализацию равнопрочности сварных соединений и отсутствие опасных видов микронеоднородности; Пр сваренных взрывом многослойных заготовок на листы толщиной до 0,5...1,0 мм с сохранением исходного соотношения толщин слоев;

— высокотемпературную ТО прокатанных листов для формирования на межслойных границах сплошных или дисперсных интерметаллидных прослоек заданной толщины, температурно-временные параметры которой учитывают систему легирования и «историю нагружения» (технологические условия СВ и Пр);

— композиционные теплозащитные элементы (КТЭ), представляющие двух- и трехслойные конструкции из активных тепловых узлов (сквозные каналы из разнородных металлов с циркулирующим хладоносителем) и пассивных узлов из формируемых на границах разнородных металлов интерметаллидных прослоек с теплопроводностью многократно ниже теплопроводности металлов, образующих КТЭ. Комплексная технология получения КТЭ включает нанесение по трафарету противосварочной пасты на соединяемые поверхности пластин в местах формирования каналов циркуляции хладоносителя; сборку и СВ пакета на оптимальном режиме; раздутие каналов циркуляции хладоносителя жидкостью или газом высокого давления, высокотемпературную ТО для создания диффузионной интерметаллидной прослойки. Общий теплозащитный эффект КТЭ является результатом тепловых процессов в активных и пассивных узлах [16];

— композиционные многоканальные теплообменники из различных сочетаний титана, алюминия, меди, магния и стали (рис. 7), изготавлива-

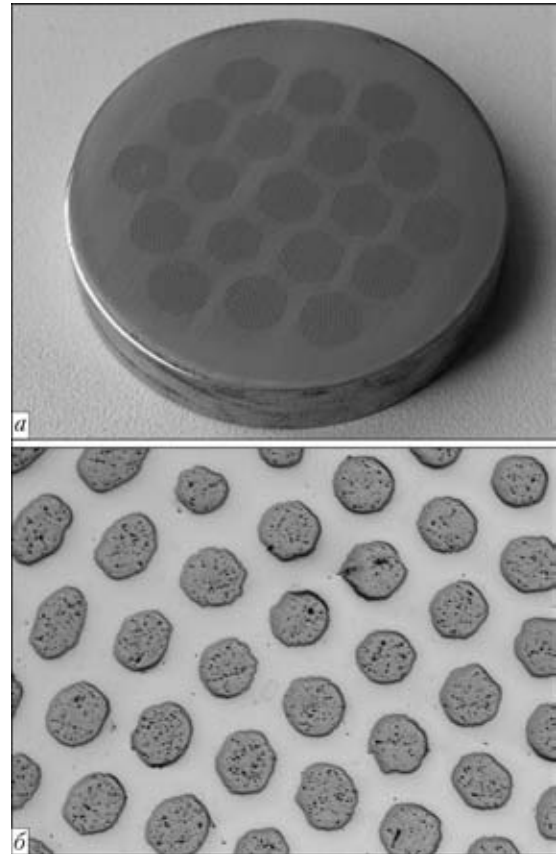


Рис. 8. Внешний вид волокнистого композита: а — темплет; б — распределение волокон в пучке (X50)

емые с помощью комплексной технологии, включающей деформирование труб для формирования рабочих каналов нужной геометрии; заливку в них наполнителя, предотвращающего недопустимые деформации при СВ; предварительную сборку изделия из разнородных элементов, способных образовывать между собой при последующей ТО интерметаллиды; одно- или двухстороннюю СВ собранной конструкции плоскими или кольцевыми зарядами взрывчатых веществ; удаление наполнителя термическими, химическими или гидравлическими способами; ТО теплообменника для формирования на границах соединения профилированных труб интерметаллидных прослоек с пониженным коэффициентом теплопроводности;

— волокнистые интерметаллидные композиты (ВИК) в виде многожильных кабелей (рис. 8) или заготовок для последующего волочения или Пр, комплексная технология производства которых предусматривает получение трех-, четырех- или шестигранных профилей проволочного типа и профилированных труб из металлов и сплавов, способных образовывать между собой интерметаллидные соединения; изготовление контейнеров, геометрия которых соответствует создаваемым ВИК; взрывное обжатие контейнеров с «набивкой» из разнородных проволочных и трубчатых элементов для реализации физического контакта и активации соединяемых поверхностей; об-



Преимущества и области применения созданных слоистых интерметаллидных композитов

Вид композита	Свойства	Область применения
Многослойные листы	Высокие жаропрочностные свойства благодаря сохранению упорядоченной структуры интерметаллидов вплоть до температуры плавления	Летательные аппараты, термически напряженное оборудование, коррозионностойкая баковая аппаратура, тяжело нагруженные узлы энергетических и криогенных установок
Композиционные теплозащитные элементы	Реализация теплозащитного эффекта за счет взаимодействия системы каналов с охлаждающей средой и интерметаллидных прослоек с низкой теплопроводностью	Криогенное, химическое и энергетическое оборудование с повышенными служебными и технико-экономическими показателями
Композиционные многоканальные теплообменники	Высокопрочное соединение элементов за счет частичного расплавления металла труб, многократное снижение теплопередачи интерметаллидными прослойками	Химические и энергетические установки с повышенными эксплуатационными и технико-экономическими показателями; криогенная техника
Волокнистые интерметаллидные композиты	Высокие жаропрочностные свойства, возможность получения сверхпроводящих кабелей	Летательные аппараты, термически напряженное оборудование, тяжело нагруженные узлы энергетических и криогенных установок, линии электропередач

работку давлением (протяжка, волочение) до достижения необходимых линейных размеров и повышения прочности контакта элементов; высокотемпературные нагревы обжатых заготовок для создания на границах разнородных элементов диффузионных интерметаллидных прослоек с требуемыми теплофизическими свойствами.

Преимущества и области применения созданных видов конструкционных и функциональных СИК приведены в таблице.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 08-08-00056 и проекта 2.1.2/573 целевой программы Рособразования «Развитие научного потенциала высшей школы».

1. Трыков Ю. П., Шморгун В. Г. Свойства и работоспособность слоистых композитов. — Волгоград: ВолгГТУ, 1999. — 190 с.
2. Трыков Ю. П., Шморгун В. Г., Гуревич Л. М. Деформация слоистых композитов. — Волгоград: ВолгГТУ, 2001. — 242 с.
3. Трыков Ю. П., Гуревич Л. М., Шморгун В. Г. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. — М.: Металлургиздат, 2004. — 230 с.
4. Трыков Ю. П., Гуревич Л. М., Арисова В. Н. Диффузионные процессы в слоистых композитах: Волгоград: ВолгГТУ, 2006. — 403 с.
5. Шморгун В. Г. Оценка затрат энергии на пластическую деформацию в зоне волнообразования при сварке взрывом // Сварочн. пр-во. — 2001. — № 3. — С. 25–27.
6. Трыков Ю. П., Гуревич Л. М., Гурулев Д. Н. Влияние прокатки при повышенных температурах на свойства титан-алюминиевого композита, полученного сваркой взрывом // Там же. — 1999. — № 6. — С. 6–10.
7. Трыков Ю. П., Шморгун В. Г., Епишин Е. Ю. Исследование влияния горячей и холодной прокатки на структуру

и свойства околосшовной контактной зоны биметалла титан-сталь, полученного сваркой взрывом // Про-во проката. — 2002. — № 8. — С. 35–39.

8. Трыков Ю. П., Шморгун В. Г., Слаутин О. В. Исследование влияния холодной прокатки на структуру и свойства околосшовной контактной зоны биметалла медь-алюминий, полученного сваркой взрывом // Там же. — 2003. — № 11. — С. 23–27.
9. Трыков Ю. П., Гуревич Л. М., Гурулев Д. Н. Диффузионные процессы при нагревах титано-алюминиевого композита, полученного сваркой взрывом // Свароч. пр-во. — 2000. — № 12. — С. 19–21.
10. Трыков Ю. П., Шморгун В. Г., Епишин Е. Ю. Диффузионные процессы в биметалле титан-сталь // Физ. и хим. обработки материалов. — 2004. — № 4. — С. 85–89.
11. Трыков Ю. П., Шморгун В. Г., Слаутин О. В. Кинетика роста диффузионных прослоек в биметалле медь-алюминий, полученном по комплексной технологии // Перспективные материалы. — 2003. — № 3. — С. 83–88.
12. Технология сварки взрывом магниев-алюминиевых композиционных соединений / Ю. П. Трыков, В. Г. Шморгун, В. Д. Рогозин, Ю. Г. Долгий // Свароч. пр-во. — 2003. — № 3. — С. 38–41.
13. Структурообразование в титано-алюминиевых композитах в присутствии жидкой фазы / Л. М. Гуревич, Ю. П. Трыков, А. Н. Жоров и др. // Журн. функциональных материалов. — 2008. — 2, № 4. — С. 153–157.
14. Механические свойства СИК системы Cu–Al при повышенных температурах / В. Г. Шморгун, Ю. П. Трыков, С. А. Абраменко, В. Н. Арисова // Изв. ВолгГТУ. Сер. Материаловедение и прочность элементов конструкций. — 2005. — № 3(12). — С. 12–16.
15. Слоистые интерметаллидные композиты системы Ti–Fe с повышенными жаропрочными свойствами / В. Г. Шморгун, Ю. П. Трыков, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова // Там же. — С. 16–21.
16. Трыков Ю. П., Шморгун В. Г., Проничев Д. В. Комплексные технологии изготовления композиционных теплозащитных элементов // Свароч. пр-во. — 2000. — № 6. — С. 40–43.

The paper describes experience of many years of development of integrated technologies of manufacturing a new class of structural materials (laminated intermetallic composites) with a unique combination of high-temperature and thermophysical properties including explosion welding to produce bimetal and multilayer materials in combination with allied technologies (different types of heat treatment and plastic working).

Поступила в редакцию 05.08.2009