

РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В ИЭС им. Е. О. ПАТОНА (Обзор)*

В. Д. ШЕЛЯГИН, А. Г. ЛУКАШЕНКО, В. Ю. ХАСКИН, А. В. БЕРНАЦКИЙ,
А. В. СИОРА, Д. А. ЛУКАШЕНКО, И. В. ШУБА

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Проведен обзор ряда разработок ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, выполненных за последние годы в области техники и технологии лазерной сварки. Данные разработки апробированы или внедрены в промышленном производстве на предприятиях Китайской Народной Республики в г. Чанчунь, г. Харбин и Украины в городах Киев, Черновцы, Днепр. Выделены сферы применения и факторы, сдерживающие тенденцию быстрого развития и внедрения технологии лазерной сварки на предприятиях Украины. Библиогр. 11, рис. 12.

Ключевые слова: лазерная сварка, разработка технологий, разработка аппаратуры и оснастки, лазерные технологические комплексы, сварные соединения, механические свойства

Глобальной тенденцией мирового прогресса в экономике наиболее развитых стран является широкое применение и совершенствование новых наукоемких перспективных технологий, например, таких как лазерные [1–5]. Использование лазерных технологий имеет решающее значение для повышения производительности труда и конкурентоспособности экономики. Отличительными особенностями применения лазеров в производстве являются высокое качество получаемых изделий, высокая производительность процессов, экономия людских и материальных ресурсов, экологическая чистота.

Лазеры, благодаря таким уникальным свойствам как высокая концентрация мощности излучения, когерентность, монохроматичность, нашли широкое применение в авиа-, ракето- и судостроении [5–9], автомобильной [8] и др. отраслях промышленности, науки, техники, связи, медицине, биологии и др. областях. Анализ объема мирового рынка реализованных источников лазерного излучения (без учета сопутствующих компонентов, технологической и др. оснастки) в 2013–2016 гг. и прогноз на 2017 г. представлены на рис. 1 [4]. Согласно данным авторитетного профильного издания «Laserfocusworld», за последние пять лет рынок лазерной техники неуклонно растет и его ежегодный объем уже превышает 10 млрд дол. США. При этом доля источников лазерного излучения, применяемых для обработки материалов, составляет около 30 % (рис. 2) [2]. В свою оче-

редь, основными технологическими операциями обработки материалов, для выполнения которых используется лазерное излучение, являются резка (35 %), сварка (25 %), микрообработка (20 %) и гравировка (15 %) [3].

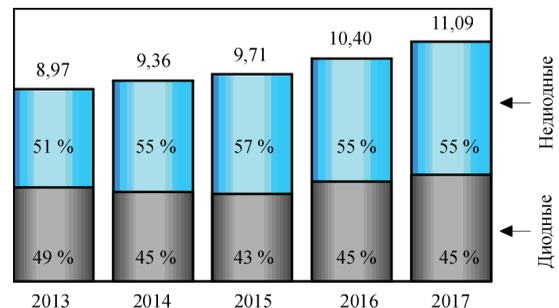


Рис. 1. Показатели продаж (в млрд дол. США) мирового рынка лазерных установок в 2013–2016 гг. (без учета манипуляторов и техоснастки) и прогноз на 2017 г. [4]

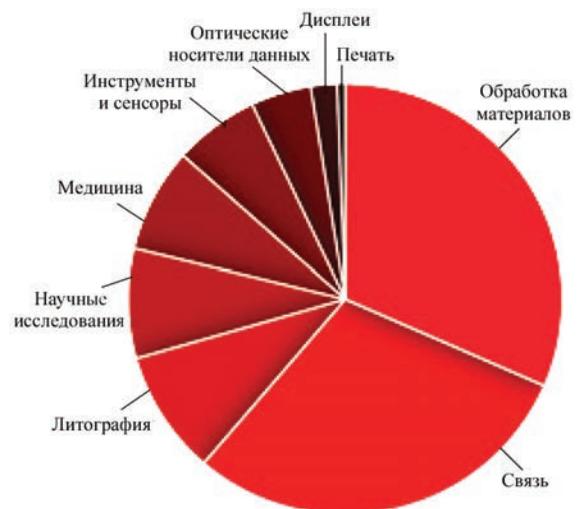


Рис. 2. Распределение применений в мире лазерных установок для различных отраслей промышленности [2]

* По материалам доклада на VIII международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» (10–16 сентября 2017 г., Одесса).

Анализ международного рынка лазерных технологий [1] позволяет выявить основные тенденции его развития. Таковыми являются:

- высокая доля стоимости затрат на оборудование в общем объеме рынка лазерных технологий;
- сохранение бизнеса лазерных технологий в странах Западной Европы, США и др. странах с развитой экономикой, что отражает необходимость использования высококвалифицированного персонала;
- высокая стоимость лазерного технологического оборудования, приводящая к снижению спроса потребителей на технику с улучшенными техническими характеристиками;
- увеличение доли услуг из-за возрастающей сложности лазерных технологических систем, что требует больших усилий и затрат на их установку, развитие и обслуживание, а также наличия обслуживающего персонала высокой квалификации;
- преимущественное привлечение сторонних организаций для выполнения функций, связанных с применением лазерных технологий.

Все перечисленные выше тенденции характерны и для рынка лазерных технологий обработки материалов в Украине. Кроме того, следует отметить, что наиболее характерными дополнительными факторами, сдерживающими развитие рынка лазерных технологий в Украине, являются:

отсутствие отечественных производителей современных мощных лазерных установок для обработки материалов;

утрата технологий изготовления расходных компонентов (оптических; силовых; электронных и др. элементов), которые были разработаны и внедрены в промышленность более 30 лет назад, а также неспособность оставшихся отечественных производств переориентироваться на потребности стремительно развивающегося рынка компонентов для лазерных технологий;

отличие долевого распределения использования лазерных технологий обработки материалов (резки, сварки, термообработки, гравировки и др.) на предприятиях Украины от данных работы [1].



Рис. 3. Внешний вид заготовки многослойного сиффона после гидроформовки

В настоящее время, по нашим данным, для рынка лазерных технологий обработки материалов Украины характерно доминантное, по сравнению с другими технологиями, использование лазерной резки (оценочно около 65 % общего рынка обрабатывающих комплексов). Из остальных технологий лазерной обработки наиболее востребованными остаются лазерная маркировка (оценочно около 15 % общего рынка обрабатывающих комплексов) и стремительно развивающаяся в последние годы технология 3D-печати (оценочно около 10 % общего рынка обрабатывающих комплексов). Рынок технологических комплексов для процессов лазерной сварки, термообработки, прошивки отверстий и др. технологий, по нашим данным, не превышает 10 % общего рынка обрабатывающих лазерных комплексов. Изменение сложившейся ситуации с «перекосом» запросов отечественного рынка обрабатывающих лазерных комплексов в сторону резки и приведение его к уровню мировых стандартов, характерных для стран с развитой экономикой, возможно путем решения ряда задач, одной из которых является разработка конкурентоспособных на мировом рынке отечественных технологий и оборудования для лазерной сварки различных материалов.

Лазерная сварка металлических материалов применяется при создании конструкций авиационных и морских судов, деталей медицинской техники и узлов приборостроения, а также во многих др. отраслях промышленности. В Украине разработками в области лазерной сварки успешно занимаются научные коллективы ИЭС им. Е. О. Патона, НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского» и др. вузов, а также научных лабораторий ряда крупных промышленных предприятий.

В данной работе проведен обзор ряда разработок в области техники и технологии лазерной сварки, которые были выполнены в ИЭС в последние годы и были апробированы или внедрены в промышленность.

В ходе выполнения научных работ в ИЭС решалась задача установления закономерностей влияния технологических параметров лазерной сварки тонкостенных труб на геометрию и механические характеристики получаемых стыковых соединений холоднокатаной ленты толщиной $\delta = 0,15 \dots 0,2$ мм из высоколегированных коррозионностойких сталей 12X18H10T (ГОСТ 4986-79) и 1.4541 (DIN EN 10028-7:2000), с учетом требований последующего изготовления из них многослойных сиффонов [10]. По результатам сравнения геометрии, структуры и механических свойств полученных соединений установлено, что определяющим параметром, влияющим на качество данного сварного соединения, является погонная энергия,



Рис. 4. Внешний вид трехкоординатного комплекса «АРМА-100М» для лазерной сварки

оптимальный диапазон варьирования которой находится в пределах 3...5 Дж/мм. Результаты, полученные в ходе проведения работы, были положены в основу разработки промышленной технологии изготовления прямошовных тонкостенных сварных труб различного диаметра из нержавеющей стали, использующихся для производства многослойных сильфонов по ГОСТ 21744-83 (рис. 3). Такие сильфоны предназначены для работы в качестве компенсационных элементов, разделителей сред, уплотнительных устройств, а также элементов силового узла в средах, не вызывающих коррозии материала, при температуре от -260 до 550 °С.

Спроектированные трехкоординатные комплексы типа «АРМА-100М» (рис. 4) для лазерной сварки прямошовных тонкостенных труб из нержавеющей стали внедрены на ЧАО «КЦКБА» (г. Киев) и ООО «НИИЦ «Арматом» (г. Киев). Применение разработанных технологических рекомендаций и оригинальной технологической оснастки позволили обеспечить производительность одного такого комплекса до 5 тыс. шт. заготовок сильфонов в месяц. Готовая продукция уже используется в различной запорной арматуре, работающей в трубопроводах повышенного давления, при постоянной высокочастотной и низкочастотной вибрации, а также в запорных узлах, требующих точной установки положения запорного органа. Изготовленные с применением лазерной сварки многослойные сильфоны сертифицированы в соответствии с требованиями норм и правил, а также др. нормативных документов, устанавливающих требования безопасности в области атомной энергетики.

Продолжением представленной выше работы стала разработка технологии и оснастки для лазерной сварки сильфонных компенсаторов. Они соединяют детали и узлы, осуществляющие в

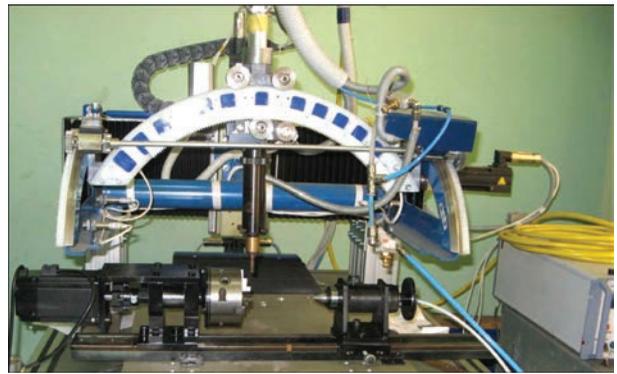


Рис. 5. Технологический комплекс для лазерной сварки сильфонных компенсаторов

процессе эксплуатации относительные перемещения или работающие в условиях вибрации. Основным рабочим элементом этих изделий является сильфон — гибкая гофрированная металлическая трубка из тонкостенной нержавеющей стали. Для получения сильфонных компенсаторов гофрированную трубку сваривают с массивной арматурой (фланцами, трубками, втулками и др.). Проведенные исследования показали, что для изготовления сильфонных компенсаторов из нержавеющей аустенитных сталей целесообразно применять сварку с импульсной модуляцией лазерного излучения. Разработаны оборудование (рис. 5) и технологические приемы лазерной сварки сильфонных компенсаторов, позволяющие получать в литом металле швов и в металле ЗТВ мелкозернистые структуры, имеющие повышенный уровень механических характеристик. Данная разработка внедрена на ПАО «Киевский завод «Аналитприбор» и ООО «НИИЦ «Арматом» для лазерной сварки корпусов датчиков (рис. 6).

Институт стратегических технологий им. академика С. Н. Конюхова (г. Днепр) на протяжении последних лет занимается проблемами разработки принципиально нового силового агрегата плазменного двигателя ПД140, который используется в составе маршевой или коррекционной двигательной установки ракетно-космической техники. Изготовление отдельных сборочных единиц



Рис. 6. Партия сильфонных компенсаторов, изготовленных с применением лазерной сварки

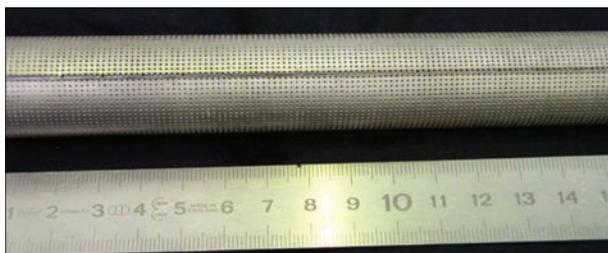


Рис. 7. Корпус тонкостенного трубчатого фильтрующего элемента, изготовленного по разработанной технологии лазерной сварки с порошковой присадкой

данного силового агрегата предполагает чрезвычайно жесткие требования по раскрою и качеству сварки его составных элементов. Совместно с ИЭС выполнены работы по апробации технологий лазерного раскроя и последующей лазерной сварки без механической обработки свариваемых кромок (250 шт.), деталей спирального нагревателя толщиной 0,25 мм (изготовленного из титанового сплава ВТ6). Результаты работ позволяют утверждать о значительном упрощении операции стыковки кромок деталей и улучшении качества сварных соединений. Исследованный уровень механических характеристик свидетельствует о высокой надежности сварных соединений и перспективности применения данных технологий в ракетно-космической отрасли.

При различных способах дуговой сварки плавлением часто используется технологический прием, заключающийся в заполнении расплавленным присадочным металлом пространства между свариваемыми кромками [11]. Аналогичный прием для лазерной сварки используется редко. Обычно стараются минимизировать зазор между соединя-



Рис. 8. Внешний вид разработанного инструмента для ручной лазерной сварки

емыми кромками и не использовать присадочные материалы (для снижения энергозатрат). Нами предложен способ соединения кромок, которые невозможно плотно состыковать (например, при наличии перфорации). В его основу положена лазерная порошковая наплавка. Свариваемые кромки сводятся с небольшим (до одного диаметра отверстия перфорации) зазором и плотно прижимаются к медной технологической подкладке. В качестве вспомогательного оборудования используется питатель-дозатор для подачи присадочного порошка с грануляцией 60...100 мкм. Материал присадки подбирается в зависимости от металла свариваемых кромок. В процессе сварки зазор заполняется порошком, который плавится лазерным излучением. Такой прием позволяет на 10...30 % повысить коэффициент поглощения лазерного излучения по сравнению с обычной сваркой. В соответствии с разработанной технологией проводилась лазерная сварка корпусов трубчатых фильтрующих элементов с толщиной стенки $\delta = 0,5 \dots 0,6$ мм (сталь X18H10T) (рис. 7). Опытно-промышленные партии корпусов трубчатых фильтрующих элементов, изготовленных в ИЭС по разработанной технологии лазерной сварки с порошковой присадкой, прошли успешные промышленные испытания и нашли свое применение при изготовлении элементов для фильтрации жидкостей на ОДО «Черновицкий химзавод» (г. Черновцы).

Для решения задач в области сварки вагоностроительного завода (г. Чанчунь, КНР), выполнена разработка инструмента для ручной лазерной сварки изделий (рис. 8), в частности, элементов внутрикорпусных конструкций вагонов современных скоростных железнодорожных поездов. Разработанный лазерный ручной инструмент входит в состав сварочной установки, которая управляется одним оператором-сварщиком. Массогабаритные характеристики разработанного ручного



Рис. 9. Внешний вид сварных швов, выполненных по криволинейной траектории с помощью инструмента для ручной лазерной сварки



Рис. 10. Внешний вид разработанной рабочей головки для лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки

лазерного инструмента позволяют производить сварку в различных пространственных положениях. Функциональные возможности разработанного инструмента позволяют выполнять сварку с перемещением источника лазерного нагрева по любой заданной траектории (рис. 9) в пределах рабочего поля размером 50×30 мм. Проведенные металлографические исследования и механические испытания нахлесточных сварных соединений из нержавеющей стали 12X18H10T (толщина листа 2 мм), полученных с использованием разработанного ручного лазерного инструмента, показали, что уровень их механических характеристик не уступает характеристикам соединений, полученных с помощью автоматической лазерной сварки.



Рис. 11. Внешний вид фрагмента корпуса аккумулятора из сплава АМг6 ($\delta = 0,8$ мм), сваренного замкнутым швом с использованием излучения волоконного лазера



Рис. 12. Корпус датчика из стали 08X18H10T, сваренный лазерным излучением

Для проведения научных исследований в области изучения физики процессов совместного воздействия лазерного излучения с длиной волны $1,07$ мкм и импульсной дуговой плазмы на различные металлы, по заказу Харбинского института сварки Академии машиностроения и технологий Китая, выполнены разработка и изготовление оборудования (рис. 10). Создан комплекс устройств, предназначенных для выполнения технологических операций лазерной, микроплазменной и гибридной лазерно-микроплазменной сварки тонколистовых ($0,1 \dots 2,0$ мм) металлов на постоянном, импульсном, переменном токе с возможностью отдельного регулирования амплитуды и длительности протекания тока, а также возможностью воздействия непрерывного или импульсного лазерного излучения.

Прошли промышленные испытания и апробацию на базе ряда украинских и зарубежных авиа- и ракетостроительных предприятий и другие научные разработки ИЭС по лазерной сварке. Среди них: сварка разнородных материалов (титановых сплавов с алюминиевыми; углеродистых с высоколегированными нержавеющей стали; сварка между собой различных марок коррозионноустойчивых высоколегированных сталей и др.); сварка стрингерных панелей и др. элементов конструкций летательных аппаратов из титановых сплавов [12]; стыковая сварка сложнопрофильных отражающих пластин из никелевых сплавов; сварка корпусных изделий из алюминиевых сплавов (рис. 11); изготовление различных датчиков из высоколегированных сталей (рис. 12) и жаропрочных сплавов.

Выводы

1. В настоящее время отличительными тенденциями, характерными для рынка лазерных технологий обработки материалов в Украине, по сравнению с международным рынком, являются: отсутствие отечественных производителей современных высокоточных мощных лазерных установок для обработки материалов; утрата технологий изготовления расходных компонентов; преваляро-

вание на отечественном рынке запросов на оборудование для резки.

2. Увеличение на отечественном рынке доли лазерной сварки возможно путем разработки отечественных технологий и создания оборудования для лазерной сварки различных материалов, конкурентоспособных ведущим мировым технологиям.

3. На сегодня технологии лазерной сварки наиболее востребованы в атомной, химической, приборо-, авиа- и ракетостроительной отраслях промышленности Украины.

4. Высокий уровень разработок ИЭС им. Е. О. Патона в области технологий и оборудования лазерной сварки подтверждается их востребованностью на мировом рынке.

Список литературы/References

1. Евстюнин Г. А. (2015) *Анализ российского и международного рынка лазерных технологий*. <http://docplayer.ru/29560271-Analiz-rossiyskogo-i-mezhdunarodnogo-rynka-lazernyh-tehnologiy-prezentaciya-k-kursu-lekcij-priglashyonogo-specialista.html>.
Evstyunin, G.A. *Analysis of Russian and international market of laser technologies*, <http://docplayer.ru/295602710Analiz-rossiyskogo-i-mezhdunarodnogo-rynka-lazernyh-tehnologiy-prezentaciya-k-kursu-lekcij-priglashyonogo-specialista.html>. [in Russian].
2. *Annual Laser Market Review & Forecast: Can Laser Markets Trump a Global Slowdown?* <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-52/issue-01/features/annual-laser-market-review-forecast-can-laser-markets-trump-a-global-slowdown.html>.
3. *Лазеры на мировом и отечественном рынке*. http://online.mephi.ru/courses/new_technologies/laser/data/lecture/1/p25.html.
Lasers in world and national market, http://online.mephi.ru/courses/new_technologies/laser/data/lecture/1/p24.html [in Russian].
4. *Annual Laser Market Review & Forecast: Where Have All the Lasers Gone?* <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-53/issue-01/features/annual-laser-market-review-forecast-where-have-all-the-lasers-gone.html>.
5. Nikolov M. (2014) Trends in Development of Weld Overlaying During the 21st Century. *Acta Technologica Agriculturae*, 17, 2, 35–38.
6. Yamaguchi T., Katoh M., Nishio K. (2009) Mechanical Properties of Aluminium Alloy Welds by Laser Beam. *Journal of Light Metal Weld. + Constr.*, 4, 13–22.
7. Cao X., Jahazi M., Immarigeon J. P., Wallace W. (2006) A Review of Laser Welding Techniques for Magnesium Alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 171, 2, 188–204.
8. Schubert E., Klassen M., Zerner I. et al. (2001) Light-Weight Structures Produced by Laser Beam Joining for Future Applications in Automobile and Aerospace Industry. *Ibid*, 115, 1, 2–8.
9. Chen H.-C., Pinkerton Andrew J., Li Lin (2011) Fibre Laser Welding of Dissimilar Alloys of Ti-6Al-4V and Inconel 718 for Aerospace Applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 52, 9, 977–987.
10. Шелягин В. Д., Лукашенко А. Г., Лукашенко Д. А. и др. (2011) Лазерная сварка тонколистовой нержавеющей стали. *Автоматическая сварка*, 4, 45–49.

Shelyagin, V.D., Lukashenko, A.G, Lukashenko, D.A. et al. (2011) Laser welding of thin-sheet stainless steel. *The Paton Welding J.*, 4, 38–42.

11. Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Шитова Л. Г. и др. (2005) Многопроходная сварка сталей больших толщин с использованием лазерного излучения. *Там же*, 10, 48–52.
Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu., Shitova, L.G. et al. (2005) Multi-pass welding of heavy steel sections using laser radiation. *Ibid.*, 10, 46–49.

В. Д. Шелягин, А. Г. Лукашенко, В. Ю. Хаскин,
А. В. Бернацкий, О. В. Сюра, Д. А. Лукашенко І. В. Шуба

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.
03150, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.
E-mail: office@paton.kiev.ua

РОЗРОБКИ В ОБЛАСТІ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ, ВИКОНАНІ В ІЕЗ ІМ. Є. О. ПАТОНА (ОГЛЯД)

Проведено огляд ряду розробок ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України, виконаних за останні роки в області техніки і технології лазерного зварювання. Дані розробки апробовані або впроваджені в промисловому виробництві на підприємствах Китайської Народної Республіки в м. Чанчунь, м. Харбін та України в містах Київ, Чернівці, Дніпро. Виділені сфери використання та фактори, що стримують тенденцію швидкого розвитку та впровадження технології лазерного зварювання на підприємствах України. Бібліогр. 11, рис. 12.

Ключові слова: лазерне зварювання, розробка технологій, розробка апаратури та оснащення, лазерні технологічні комплекси, зварні з'єднання, механічні властивості

V.D. Shelaygin, A.G. Lukashenko, V.Yu. Khaskin,
A.V. Bernatskii, A.V. Siora, D.A. Lukashenko, I.V. Shuba

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.
11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kiev, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF LASER WELDING EQUIPMENT AND TECHNOLOGIES PERFORMED AT E.O. PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE (REVIEW)

The paper provides a review of a series of developments of E. O. Paton Electric Welding Institute performed in course of the latest years in the field of laser welding equipment and technologies. These developments were tested or implemented in commercial production at the enterprises of People's Republic of China in Changchun and Harbin and in Ukraine in Kiev, Chernovtsy and Dnipro. The spheres of application and factors limiting the tendency of fast development and implementation of laser welding technology at Ukrainian enterprises have been outlined. 11 Ref., 12 Fig.

Keywords: laser welding, technology development, development of apparatus and fixture, laser technological complexes, welded joints, mechanical properties

Поступила в редакцію 07.11.2017