

PHASE TRANSFORMATIONS

PACS numbers: 62.23.St, 62.50.Ef, 81.05.Bx, 81.05.U-, 81.07.De, 81.20.Vj

Нанорозмірні продукти в процесах утворення з'єднання металевих поверхонь у разі зварювання тиском в середовищі вуглеводневих речовин

О. В. Жартовський, В. О. Маневич*, І. Лапскер**

*Донбаська державна машинобудівна академія,
вул. Академічна, 72,
84313 Краматорськ, Україна*
**‘Top Iso Engineering Ltd.’, Kannot Industrial Zone,
20 Ha-Yarok Str., Holon, Israel*
***Technological Institute,
52 Golomb, Holon, Israel*

Експериментально досліджено роль дисперсних частинок і вуглецевих нанотворень у процесі взаємодії поверхонь, що з'єднуються у разі зварювання тиском з використанням прошарку з вуглеводневих речовин. Встановлено, що у просторі між поверхнями, які з'єднуються електричним вибухом, в результаті хімічних реакцій утворюється нова структура з високою електропровідністю. Вона існує малий проміжок часу і розкладається під дією нагрівання, спричиненого проходженням електричного струму. З використанням методів електронної та оптичної мікроскопії вивчено будову нанопродуктів, що утворюються між з'єднуваними поверхнями. Встановлено експериментальним шляхом, що проміжною структурою є вуглецеві нанотрубки. Показано, що електровибухові та електромагнетні явища в зварюваному стикі, які супроводжують цей процес, активують дифузійну здатність з'єднуваних поверхонь. Процес здійснюють за температур нижчих за температури топлення зварювальних матеріалів.

Corresponding author: Alexander Vladimirovich Jartovsky
E-mail: avpivras@gmail.com

*Donbass State Engineering Academy,
72 Akademichna Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine*
**‘Top Iso Engineering Ltd.’, Kannot Industrial Zone, 20 Ha-Yarok Str., Holon, Israel*
***Technological Institute, 52 Golomb, Holon, Israel*

Citation: A. V. Jartovsky, V. Manevich, and I. Lapsker, Nanoscale Products in Processes of Formation of Connection of Metal Surfaces During Pressure Welding in the Environment of Hydrocarbon Substances, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **43**, No. 9: 1195–1205 (2021) (in Ukrainian), DOI: [10.15407/mfint.43.09.1195](https://doi.org/10.15407/mfint.43.09.1195).

лів.

Ключові слова: зварювання тиском, вуглеводневі речовини, електричний вибух, нанотрубки, дифузія, електричний струм.

A role of dispersed particles and carbon nanoformations in the process of interaction of joined surfaces during pressure welding using a layer of hydrocarbon substances is experimentally studied. As found, in the space between the joined surfaces during an electric explosion, a new structure with high electrical conductivity is formed as a result of chemical reactions. It exists for a short period of time and decomposes under the influence of heating by passing electric current. Using the methods of electron and optical microscopy, the structure of nanoproducts formed between the joined surfaces is studied. As experimentally established, the carbon nanotubes are an intermediate structure. As shown, the electric explosive and electromagnetic phenomena in the welded joint accompanying this process activate the diffusion ability of the joined surfaces. The process is carried out at temperatures lower than melting temperatures of the welded materials.

Key words: pressure welding, hydrocarbon substances, electric explosion, nanotubes, diffusion, electric current.

(Отримано 5 січня 2020 р.; остаточн. варіант — 10 травня 2021 р.)

1. ВСТУП

Зварювання тиском використовують для виробництва різних виробів в техніці. Застосовують переважно для виготовлення біметалевих заготовок. У разі зварювання тиском з'єднання створюють в різних захисних середовищах. Відомі, наприклад, способи зварювання тиском у вакуумі [1], інертних і активних газах, розтопах солі [2]. Зазначені методи вимагають застосування спеціального дорогого устаткування. Це обмежує можливості їх застосування. Дешевше і простіше виявилось рішення задачі авторами роботи [3], які запропонували використовувати для підвищення продуктивності процесу вводити вуглеводневі речовини в простір між зварюваними поверхнями. До теперішнього часу в літературних джерелах не має опису процесів які відбуваються у разі утворення зварного з'єднання в середовищі вуглеводневих речовин. Завдання має велике практичне значення і актуальність.

Передбачається, що в процесі зварювання в вуглеводневому середовищі між поверхнями, які зварюють, відбуваються перетворення, які мають істотний вплив на весь процес. Одним з таких перетворень є піроліз вуглеводневих речовин, завдяки якому з них утворюються струмопровідна речовина. Іншим перетворенням є взаємодія отриманих продуктів піролізу зі зварюваними поверхнями. Для підтвердження зазначених припущень недостатньо тільки кін-

цевого продукту, яким є зварене з'єднання. Для підтвердження цієї гіпотези необхідно встановити які проміжні продукти утворюються і потім піддаються піролізу.

Відомо [4], що в механічному контакті поверхонь фактична площа торкання складає лише незначну частину поверхні від 0,01% до 0,1% її номінальної величини. Це означає, що величина щільності проходить електричного струму, що проходить в початковий період процесу, вище номінальної в 10^3 – 10^4 разів. Отже, виникають передумови для високошвидкісного нагрівання малої по масі кількості матеріалу в точках торкання поверхонь.

У разі проходження електричного струму в місцях контакту металевих поверхонь відбувається перегрів і вибуховий випар металу. Тривалість вибухових процесів та їхньої швидкості досліджено на вибухах тонких дротів, розміри поперечного перерізу яких порівняні з розмірами площі торкання виступів мікрорельєфу зварюваних поверхонь [5]. Час вибуху за даними [5] становить близько (120–300) наносекунд, швидкість розльоту частинок до $2,8 \cdot 10^3$ м/с. Електричний вибух в місці механічного контакту поверхонь супроводжується утворенням ударної хвилі в середовищі вуглеводневої речовини. Відбувається утворення плазмового проміжку. За високого тиску та високих температур відбуваються хемічні реакції. За даними роботи [6] в електрохемічних процесах можуть існувати умови для утворення вуглецевих нанотрубок. Дослідженнями [7] показана можливість утворення вуглецевих нанотрубок в умовах високих тисків і температур.

Можна припустити, що в просторі між зварюваними поверхнями під час електричного вибуху внаслідок хемічних реакцій утворюється нова речовина з високою електропровідністю. Вона існує малий проміжок часу і розкладається під дією нагрівання електричним струмом. Електромагнетні явища, які супроводжують цей процес, активують дифузійну здатність зварюваних поверхонь. Якщо буде відома будова отриманих речовин, можна згідно відомим аналогам визначити їхні властивості. Якщо відомі властивості цих речовин, можна уявити механізм їх перетворень у разі нагрівання в мікроб'ємах між зварюваними поверхнями.

Для підтвердження цього припущення необхідно виділити речовини, що утворюються на поверхні металу у разі нагрівання і одночасному пропусканні електричного струму через вуглеводневу речовину і речовину, яка утворюється у разі піролізу на поверхні під час нагрівання металу за рахунок теплопровідності.

Метою представленої роботи є експериментальна перевірка гіпотези про те, що в просторі між поверхнями, які сполучаються у разі електричного вибуху в результаті хемічних реакцій, утворюється нова речовина з високою електропровідністю. Вона є проміжною, існує малий проміжок часу і розкладається під дією електричного

струму. Електромагнетні явища, які супроводжують цей процес, активують дифузійну здатність поверхонь, що з'єднуються.

Завданнями роботи є розробка методики і пристроїв для виявлення проміжних структур, що утворюються на поверхні металу у разі пропускання електричного струму через вуглеводневу речовину і утворюються у разі піролізу на поверхні металу в результаті непрямого нагрівання за рахунок теплопровідності, а також експериментально підтверджено вплив пинч-ефекту на переміщення продуктів піролізу в місцях з'єднання.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

Дві зварювані металеві поверхні мають мікронерівності рельєфу без механічних і хемічних забруднень. Між цими поверхнями розміщують прошарок вуглеводневої речовини. Обидві поверхні, що зварюються, призводять до зіткнення. Через них пропускають електричний струм. У результаті пропускання електричного струму в місцях контакту відбувається швидке нагрівання і електричний вибух. Під час вибуху утворюється вибухова хвиля, нагріваються металеві поверхні, піроліз вуглеводневої речовини, продукти піролізу надходять у простір між металевими поверхнями (рис. 1).

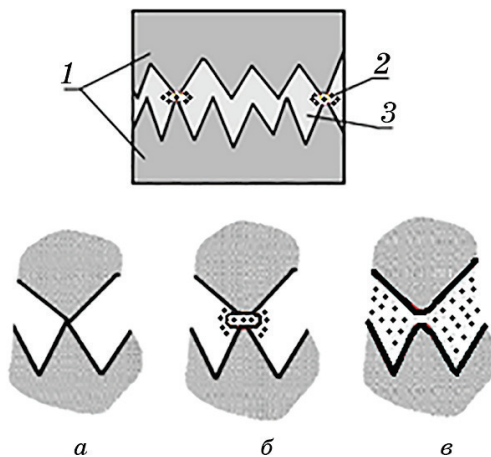


Рис. 1. Схема зварюваного стику: 1 — зварювані поверхні; 2 — електричний вибух в місцях контакту виступів мікрорельєфу (а — контакт; б — вибух, створення ударної хвилі; в — множинні мікробибухи); 3 — продукти піролізу.

Fig. 1. Scheme of the welded joint: 1—surfaces to be connected; 2—electric explosion at the points of contact of the micro relief protrusions (а—contact; б—explosion, shock wave formation; в—multiple micro explosions); 3—pyrolysis products.

Основними факторами, що впливають на утворення продуктів, є і нагрів, і дія самого електричного струму. Для дослідження утворення наноструктур використано оригінальні експериментальні методики, які передбачають отримання зазначених продуктів і виключають їхнє подальше руйнування, як це відбувалося б в мікросферах між металевими поверхнями у разі зварювання. Одним з факторів що впливає на створення наноструктур є електричний струм. Тому одна з експериментальних методик передбачала отримання наноструктур в вуглеводневій середовищі під дією електричного струму. Інша експериментальна методика передбачала їх утворення у разі нагрівання вуглеводневої сполуки.

Було створено експериментальну установку, яка дозволила одержати нанопродукти в результаті електричного розряду в вуглеводневій речовині. Електричний розряд здійснювали без перегріву, що призводило до руйнування одержаного продукту.

Для проведення експерименту використовували пристрій, який зображено на рис. 2.

Прозора скляна ємність з електродами у вигляді стрижня з вольфраму і графітової пластини заповнювали вуглеводневим речовиною, через яку пропускали постійний струм. Як вуглеводневу речовину використовували етиловий спирт. Етиловий спирт має хемічну формулу C_2H_5OH , вміст вуглецю 52,14%. За нормального тиску етиловий спирт кипить за температури $78,3^{\circ}C$. У разі пропускання електричного струму відбувається розкладання етилового спирту на вуглець і газоподібні продукти реакції. Вольфрамовий електрод

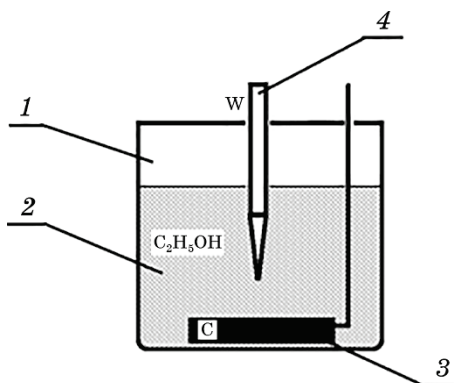


Рис. 2. Пристрій для одержання наноутворень на металевій поверхні електрода у разі пропускання електричного струму: 1 — скляна ємність; 2 — досліджувана речовина; 3 — графітовий електрод; 4 — вольфрамовий електрод.

Fig. 2. Device for producing nanoformations on the metal surface of the electrode by passing an electric current: 1—glass container; 2—test substance; 3—graphite electrode; 4—tungsten electrode.

інтенсивно охолоджували. Це давало можливість зберегти нанопродукти, які виділилися на електроді. Одержані нанопродукти досліджували на растровому електронному мікроскопі.

Інша методика передбачала дослідження нанопродуктів, які утворюються у разі нагрівання і скипання вуглеводневих рідин на металевій поверхні. Для цього використовували металеву ємність, встановлену на нагрівальний пристрій. На дні ємності розміщували шар вуглеводневої рідини і піддавали швидкісному нагріву. Для проведення експерименту використовували пристрій, зображений на рис. 3.

Було використано вуглеводневу речовину гліцерин. Гліцерин має хемічну формулу $C_3H_5(OH)_3$, вміст вуглецю 52,12%. Гліцерин кипить за температури 260°C. Досліджувану речовину поміщали в металеву ємність. Ємність нагрівали. Нагрівання металевої поверхні здійснювали зі швидкістю від 200 до 2000°C/с. Отримані проміжні структури вивчали методами рентгеноструктурного аналізу.

Переміщення продуктів піролізу вуглеводневої речовини під дією пінч-ефекту імпульсного електричного струму вивчали експериментальним шляхом. Для цього зварювали сталеві заготовки діаметром 15 мм з торцями, обробленими до висоти мікронерівностей 3,2 мкм. Торці перед зварюванням покривали флюсом, що містив незатверділу епоксидну смолу, нагрівали до температур 1150–1200°C зі швидкістю нагрівання поверхонь, що з'єднуються, 150°C/с. Після закінчення процесу зварювання утворювався викид речовини із зони стику. Речовина збиралася в центральній зоні стику під дією сили Лоренца. Для виявлення капсули, в якій збиралася ця речовина і каналу його виходу, зварені заготовки піддавали механічній обробці. Пошарово знімали метал в площині перпендикулярній поверхням зварювання. Готували мікрошліфи, ви-

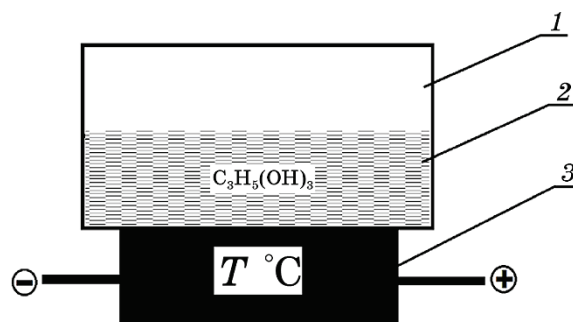


Рис. 3. Пристрій для отримання наноутворень на металевій поверхні: 1 — металева ємність; 2 — досліджувана речовина; 3 — нагрівач.

Fig. 3. Device for producing nanoformations on a metal surface: 1—metal tank; 2—test substance; 3—heater.

вчали устрій зварного шва, виявляли устрій капсули і каналу виходу речовини.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Одержані наноутворення на металевій поверхні електрода у разі пропускання електричного струму, показано на рис. 4.

Наноутворення, одержані на металевій поверхні у разі нагрівання без пропускання електричного струму, показано на рис. 5.

Представлені на рисунках 4 і 5 наноутворення на металевій поверхні мають устрій нанотрубок різної конфігурації. Для їх синтезу потрібно високий тиск і висока температура. Вуглецеві нанотрубки [8, 9] є основним продуктом, що утворюється у разі піролізу. Для нанотрубок характерна висока електропровідність [10], стійкість до високих температур, висока емісійна здатність [11–14]. У разі проходження електричного струму через нанотрубки вони нагріваються і розкладаються під дією високих температур. Це явище супроводжується мікрровибухом з ударною хвилею, утворенням мікропіпнчей та електромагнетним впливом на кристалічну ґратницю тонкого шару зварюваних поверхонь. На утворені йонізовані частинки діє магнетне поле імпульсного електричного струму і проявляється пінч-ефект.

Під час утворення зварного з'єднання дія пінч-ефекту призводить до переміщення частинок вуглецю до центру стику, де воно накопичується і утримується дією сили Лоренца. У разі досягнення критичного значення щільності і тиску речовини, зібраної в мікрооб'ємах

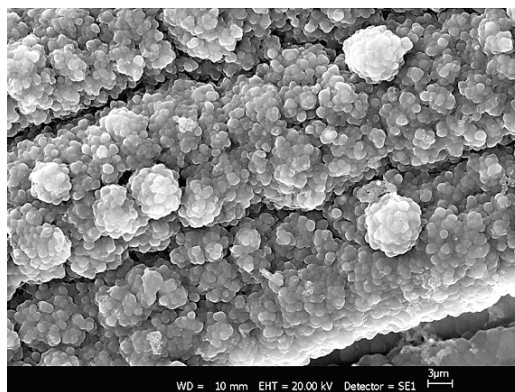


Рис. 4. Наноутворення на металевій поверхні електрода, одержані у разі пропускання електричного струму.

Fig. 4. Nanoformations on the metal surface of the electrode obtained by passing an electric current.

капсули, відбувається кулонівський вибух і викид продукту.

Цей ефект є експериментальним підтвердженням робіт [15–17]. Вихід продуктів супроводжується яскравим спалахом і миттєвим згорянням без твердих залишків на повітрі. На рисунку 6 показано фрагмент мікрокамери, в якій збиралися продукти піролізу з вихідним отвором.

Сварка стику сталевих заготовок відбувається за температур в інтервалі 1150–1200°C, тобто без розтоплення. Цей факт свідчить про наявність дифузійних процесів, які стимулюються електровибуховими і електромагнетними процесами в зварюваному стику. За даними досліджень [18, 19] важливе значення для активації дифузійних процесів має наявність ударних хвиль.

Мікроструктуру дифузійного зварного з'єднання сталі Р6М5К5



Рис. 5. Нанотворення на металевій поверхні, одержані у разі нагрівання без пропускання електричного струму.

Fig. 5. Nanoformations on a metal surface obtained by heating without passing an electric current.

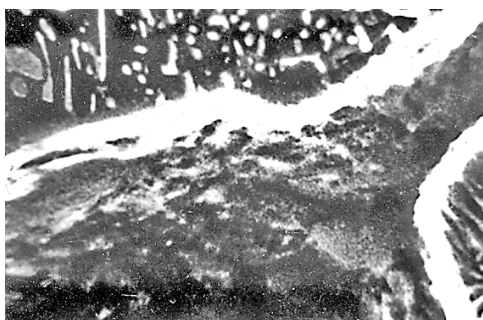


Рис. 6. Фрагмент мікрокамери.

Fig. 6. A fragment of microcamera.

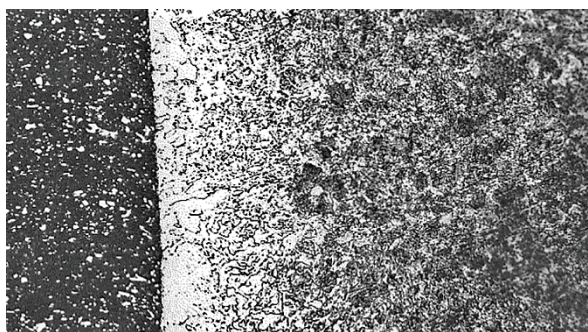


Рис. 7. Мікроструктура дифузійного зварного з'єднання.

Fig. 7. The microstructure of diffusion welded joint.

зі сталлю 45 показано на рис. 7.

Зварені заготовки мали міцність на рівні основного матеріалу.

4. ВИСНОВКИ

Розроблено методику дослідження і пристрої для оцінки можливості синтезу проміжних нанопродуктів у разі електричного розряду в вуглеводневій речовині з виділенням їх на електроді і на металевій поверхні у разі нагрівання без пропускання електричного струму. Розроблено методику дослідження впливу пинч-ефекту на переміщення продуктів піролізу вуглеводневої речовини в стику у разі зварювання. Для досліджень застосовані рентгеноструктурний і металографічний аналізи. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що у разі пропускання електричного струму постійної полярності через вуглеводневу речовину відбувається виділення нанотрубок. У разі нагрівання металевої поверхні без пропускання електричного струму також утворюються нанотрубки. Встановлено, що під дією сили Лоренца частки, які утворюються в результаті піролізу вуглеводневої речовини, знаходяться в зварюваному стику і переміщуються до центру стику. Там утворюється капсула з речовиною, яка виділяється з яскравим спалахом і миттєвим згорянням на повітрі без твердих залишків. Зварне з'єднання утворюється за температур нижче температур топлення металів, що зварюються. Це свідчить про високу дифузійну активність матеріалу зварюваних поверхонь, що утворилася в результаті впливу електровибухових та електромагнетних процесів на кристалічну ґратницю. Експериментальним шляхом здійснена перевірка гіпотези про те, що в просторі між поверхнями, які сполучаються у разі електричного вибуху в результаті хемічних реакцій утворюється нова структура з високою електропровідністю. Утворені

нанотрубки є проміжною структурою. Нанотрубки існують малий проміжок часу і розкладаються під дією електричного струму. Електромагнетні та електровибухові явища, які супроводжують цей процес, активують дифузійну активність зварюваних поверхонь.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Н. Ф. Казаков, *Диффузионная сварка материалов* (Москва: Машиностроение: 1976), с.312.
2. М. Л. Финкельштейн, *Диффузионная сварка в жидких средах* (Москва: Металлургия: 1978) с. 64.
3. С. П. Кочармин, А. П. Семенов, Н. В. Гузев, *Способ сварки давлением и машина для его осуществления*: Авторское свидетельство СССР 4975280. В23К 11/02 (Опубл. 1979 г.).
4. Н. Б. Демкин, *Контактирование шероховатых поверхностей* (Москва: Наука: 1970), с.277.
5. А. Е. Борисевич, С. Л. Черкас, *Журнал технической физики*, **82**, № 10: 58 (2012).
6. Н. И. Алексеев, С. В. Половцев, Н. А. Чарыков, *Журнал технической физики*, **76**, № 3: 57 (2006).
7. Ю. С. Буранова, *Труды МФТИ*, **3**, № 3: 30 (2011).
8. П. Харрис, *Углеродные нанотрубы и родственные структуры. Новые материалы XXI века* (Москва: Техносфера: 2003), с. 336.
9. С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев, *Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение* (Москва: Машиностроение: 2008), с. 320.
10. А. В. Гец, В. П. Крайнов, *ЖЭТФ*, **150**, № 6 (12): 1246 (2016).
11. Ю. В. Гуляев, Н. И. Синицын, Г. В. Торгашов, А. И. Жбанов, И. Г. Торгашов, С. Г. Савельев, *Радиотехника и электроника*, **48**, № 11: 1399 (2003).
12. М. Ю. Васильков, Ф. С. Федоров, Н. М. Ушаков, С. Ю. Суздальцев, *Письма в ЖТФ*, **41**, № 1: 57 (2015).
13. А. В. Елецкий, *Успехи физических наук*, **172**, № 4: 401 (2002).
14. С. В. Булярский, А. А. Дудин, А. В. Лакалин, А. П. Орлов, А. А. Павлов, Р. М. Рязанов, А. А. Шаманаев, *Журнал технической физики*, **88**, № 6: 921 (2018).
15. В. В. Комаров, А. М. Попова, И. О. Стурейко, Л. Шмидт, Х. Юнглас, *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*, № 1: 3 (2013).
16. И. А. Андрияш, В. Ю. Быченков, В. Ф. Ковалев, *Письма в ЖЭТФ*, **87**, № 11: 72 (2008).
17. A. Heidenreich, J. Jortner, and I. Last, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. **103**: 589 (2006).
18. В. Г. Мягков, *Доклады Академии наук*, **392**, № 1: 54 (2003).
19. А. А. Мхитарян, *Хим. журнал Армении*, **59**, № 11: 42 (2006).

REFERENCES

1. N. F. Kazakov, *Diffuzionnaya Svarka Materialov* [Diffusion Welding of

- Materials] (Moscow: Mashinostroenie: 1976), p. 312 (in Russian).
2. M. L. Finkel'shteyn, *Diffuzionnaya Svarka v Zhidkikh Sredakh* [Diffusion Welding in Liquids] (Moscow: Metallurgiya: 1978), p. 64 (in Russian).
 3. S. P. Kocharmin, A. P. Semenov, and N. V. Guzev, *Sposob Svarki Davleniem i Mashina dlya Ego Osushchestvleniya* [Method of Pressure Welding and Machine for Its Implementation] Authors' Certificate 4975280 SSSR. B23K 11/02 (Published 1979) (in Russian).
 4. N. B. Demkin, *Kontaktirovanie Sherokhovatykh Poverkhnostey* [Rough Surface Contact] (Moscow: Nauka: 1970), p. 277 (in Russian).
 5. A. E. Borisevich and S. L. Cherkas, *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, **82**, No. 10: 58 (2012) (in Russian).
 6. N. I. Alekseev, S. V. Polovtsev, and N. A. Charykov, *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, **76**, No. 3: 57 (2006) (in Russian).
 7. Yu. S. Buranova, *Trudy MFTI*, **3**, No. 3: 30 (2011) (in Russian).
 8. P. Kharris, *Uglerodnye Nanotruby i Rodstvennye Struktury. Novye Materialy XXI Veka* [Carbon Nanotubes and Related Structures. New Materials of the XXI Century] (Moscow: Tekhnosfera: 2003), p. 336 (in Russian).
 9. S. V. Mishchenko and A. G. Tkachev, *Uglerodnye Nanomaterialy. Proizvodstvo, Svoystva, Primenenie* [Carbon Nanomaterials. Production, Properties, Application] (Moscow: Mashinostroenie: 2008), p. 320 (in Russian).
 10. A. V. Gets and V. P. Krainov, *J. Exp. Theor. Phys.*, **123**: 1084 (2016) (in Russian).
 11. Yu. V. Gulyaev, N. I. Sinitsyn, G. V. Torgashov, A. I. Zhbanov, I. G. Torgashov, and S. G. Savel'ev, *Radiotekhnika i Elektronika*, **48**, No. 11: 1399 (2003) (in Russian).
 12. M. Yu. Vasil'kov, F. S. Fedorov, N. M. Ushakov, and S. Yu. Suzdal'tsev, *Pis'ma v ZhTF*, **41**, No. 1: 57 (2015) (in Russian).
 13. A. V. Eletskii, *Physics-USpekhi*, **45**, No. 4: 369 (2002) (in Russian).
 14. S. V. Bulyarskiy, A. A. Dudin, A. V. Lakalin, A. P. Orlov, A. A. Pavlov, R. M. Ryazanov, and A. A. Shamanaev, *Technical Physics*, **63**: 894 (2018) (in Russian).
 15. V. V. Komarov, A. M. Popova, I. O. Stureyko, L. Shmidt, and Kh. Yungklas, *VMU. Seriya 3. Fizika. Astronomiya*, No. 1: 3 (2013) (in Russian).
 16. I. A. Andriyash, V. Y. Bychenkov, and V. F. Kovalev, *Jetp Lett.*, **87**: 623 (2008) (in Russian).
 17. A. Heidenreich, J. Jortner, and I. Last, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**: 589 (2006).
 18. V. G. Myagkov, *Doklady Akademii Nauk*, **392**, No. 1: 54 (2003).
 19. A. A. Mkhitaryan, *Khim. Zhurnal Armenii*, **59**, No. 11: 42 (2006) (in Russian).