

## ВИБУХ ЗВАРЮЄ І РОЗРІЗАЄ МЕТАЛ

У другій половині ХХ століття різко збільшується обсяг застосування алюмінієвих і титанових сплавів в якості конструкційних матеріалів. Основною причиною став перехід техніки на екстремальні умови експлуатації. Зварні з'єднання повинні були витримувати значні динамічні навантаження, екстремально низькі та високі температури, агресивні середовища тощо. Частина вузлів машин, апаратів і багатьох інших конструкцій працювали в різних умовах і необхідно було виготовляти їх із металів і сплавів, властивості яких між собою відрізняються. Виникла проблема зварювання різнорідних металів. Найбільшим попитом користувалися вироби з наступних пар металів та їх сплавів: алюміній-титан, титан-сталь, сталь-алюміній. Відомо, що при їх поєднанні методами зварювання плавленням утворювалися інтерметаліди з неприпустимими експлуатаційними властивостями (крихкістю, тріщинами та т.п.). З усього спектру способів зварювання найефективнішою технологією, яка вирішила завдання з'єднання цих металів, виявилось зварювання вибухом (ЗВ). Його розробили на базі результатів досліджень з керування горінням і вибухом, кумулятивного ефекту та теорії пластичності.

У СРСР в 1925–1926 рр. вивченням вибухових речовин (ВР) займався М.Я. Сухаревський. Дослідженням порохових ВР приділяли увагу при розробці бойових ракет. Інтенсивні дослідження впливу ВР розгорнулися у зв'язку з роботами зі створення атомних бомб. У створенні перших атомних бомб у США брав участь завідувач відділу розробки вибухових речовин у Лос-Аламосі Г.В. Кістяківський (народився у м. Боярка, Київський повіт, Київська губернія, радник президента Д. Ейзенхауера у справах науки і техніки, 1959–1961 рр.). Його основний внесок полягав у створенні вибухівки «боратол» – детонатора, який забезпечив точний і потужний імпульс для ініціювання ланцюгової реакції в плутонієвій бомбі. У 1938 р. завідувач лабораторії в Інституті хімічної фізики Я.Б. Зельдович зробив значний внесок у теорію горіння та вибуху, а також запропонував модель плоскої детонації. Виникла область фізики та фізикохімії високих температур. У 1941 р. Я.Б. Зельдович розрахував внутрішню балістику реактивного снаряда установки «Катюша». Його праці з фізики вибуху, детонації та ударних хвиль і ядерної фізики були використані при створенні атомної (1949 р.) і водневої бомб (1953 р.) у СРСР.

В історії техніки, військової та вибухової справи були випадки, коли утворювалися з'єднання куль і снарядів з металевими тілами при їх зіткненні, які за своєю природою розцінювалися як чисто механічні. У 1792 р. гірський інженер Франц фон Баадер висловив припущення, що енергію вибуху можна сконцентрувати на невеликій площі, використовуючи пустотілий заряд. Однак у своїх експериментах Баадер використав чорний порох, який не може формувати необхідну хвилю детонації. Вперше продемонструвати ефект застосування пустотілого заряду вдалося лише з винаходом високобризантних ВР. Це зробив у 1883 р. Макс фон Ферстер. У 1888 р. у США кумулятивний ефект досліджував та описав Чарльз Манро. У 1938 р. Франц Томанек у Німеччині та Генрі Мохоупт у Швейцарії незалежно один від одного відкрили ефект збільшення пробивної здатності при застосуванні металевого облицювання конуса, на зовнішній поверхні якого розташовано шар ВР. Кумулятивний ефект – ефект Манро почали використовувати у дослідницьких цілях (можливість досягнення великих швидкостей речовини – до 90 км/с), у гірській справі, у військовій справі (бронебійні снаряди).

У 1941–1943 рр. співробітники Інституту математики АН УРСР під час евакуації до Уфи під керівництвом М.О. Лаврентьєва вивчали дію на перешкоду металевого стрижня, що рухається з великою швидкістю вздовж осі. Цим передбачається, по суті, ідея кумулятивної дії вибуху, теорією якого М.О. Лаврентьєв впритул зайнявся після повернення до м. Києва. Він запропонував оригінальне гідродинамічне трактування явища кумуляції, відповідно до якого при величезних тисках,



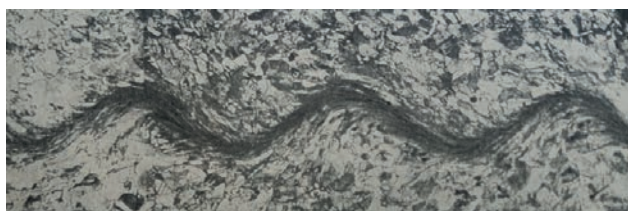
У демонстраційній залі ІЕЗ, 1986 р., зліва направо: Б.О. Мовчан, В.М. Бернадський, О.М. Корніснко, Я.Б. Зельдович, Д.А. Дудко, Б.С. Патон

що виникають у момент вибуху, метал можна розглядати як ідеальну рідину, яка не стискається; після цього, використовуючи рівняння гідродинаміки, можна було розрахувати динаміку струменя та обчислити пробивний ефект.

Утворення нероз'ємних з'єднань металів при ударі, викликаному вибухом, встановили одночасно незалежно в УРСР і США. У 1944 р. в американському журналі Л.Р. Карл описав випадок з'єднання двох латунних дисків, що метаються за допомогою детонатора. У 1944–1946 рр. М.О. Лаврентьев та його співробітники в Інституті математики АН УРСР у м. Києві при проведенні експериментів з кумуляції отримали перші зразки з'єднання – монолітні стрижні з пучків мідних дротів, осесиметричні та біметалеві зразки з характерним для зварювання вибухом явищем хвилеутворення на поверхні контакту тіл, що стикаються.

Учасник цих робіт М.М. Ситий зварював монолітні стрижні з пучків мідного дроту, обмотуючи їх шнуром, що детонував. У 1950 р. у США Г. Кован і Дж. Дуглас дослідили косі зіткнення пластин і розробили першу практичну технологію зварювання вибухом. У 1958 р. в Інституті гідродинаміки Сибірського відділення АН СРСР (м. Новосибірськ) продовжено дослідження в напрямку металообробки вибухом (М.О. Лаврентьев, Ю.І. Фадеєнко).

У 1950-х роках розвиток і широке впровадження технології штампування вибухом надало можливість застосування вибухових речовин для з'єднання металів. У ці ж роки Г. Кован, А. Хольцман і Дж. Дуглас з американської фірми «Дюпон Де Не-



Ефект явища хвилеутворення при зварюванні вибухом



Зварний зразок з хвильовою поверхнею

мур» у результаті досліджень косих зіткнень пластин, що металася плоским зарядом ВР, розробили досконалу технологію зварювання вибухом, яка була запатентована та опублікована тільки в 1964 р.

У СРСР системні дослідження процесу ЗВ розгорнуто на початку 1960-х років, зокрема в Інституті гідродинаміки. Надалі науково-дослідні роботи зі ЗВ проводилися в ІЕЗ ім. Є.О. Патона (ІЕЗ), у Дніпропетровському гірничому інституті, у Волгоградському політехнічному інституті, у Всесоюзному науково-дослідному та конструкторсько-технологічному інституті трубної промисловості (ВНДКТП) (м. Дніпропетровськ) та ін.

Для отримання належного зварного з'єднання необхідно було навчитися керувати локальним вибухом, визначити склад ВР, технології підготовки кромки і поверхонь перед зварюванням, геометрію розташування елементів (листи, труби, стрижні), що зварюються, і шару ВР на їх поверхнях, особливості з'єднання різних металів, вирішити проблему техніки безпеки при проведенні вибухових робіт. В ІЕЗ розпочато інтенсивний пошук методів зварювання різномірних металів. «Протокол наради у директора ІЕЗ від 03 жовтня 1964 р. № 548. «Про виконання та подальший розвиток в ІЕЗ робіт зі зварювання різномірних матеріалів. Вирішили: Відзначити, що розвиток хімічного машинобудування, атомної енергетики та інших галузей техніки висунув актуальне завдання створення основ зварювання конструкцій та виробів із різномірних металів. Вважати однією з найважливіших тем, які мають розроблятися у технологічних відділах ІЕЗ».

Роботи зі створення лабораторії зварювання вибухом в ІЕЗ розпочав М.Г. Остапенко. З 1967 р. лабораторією, а з 1972 р. – відділом зварювання, різання та обробки металів вибухом почав керувати д.т.н. В.М. Кудінов. У 1980–2003 рр. цей відділ очолював д.т.н. В.Г. Петушков.

В ІЕЗ було досліджене явище хвилеутворення на поверхні з'єднання вибухом – з'єднання у формі хвиль, розглянуто питання формування руйнівних залишкових напружень при ЗВ і методи боротьби з ними, розроблено пружнопластичну модель хвилеутворення, що дозволяла врахувати індивідуальні властивості ЗВ різних металів і сплавів. Було розроблено промислові технології обробки вибухом зварних з'єднань металоконструкцій відповідального призначення для забезпечення їх експлуатаційної надійності (В.М. Кудінов, В.Г. Петушков). У Дніпропетровському гірничому інституті та ВНДКТП трубної промисловості досліджували та розробляли технологічні процеси зварювання, зміцнення й отримання нових мате-

ріалів за допомогою вибуху. (Р.П. Дідик, М.П. Юрченко, Ю.В. Гаєк та ін.).

Під керівництвом В.М. Кудінова проведено фундаментальні дослідження зварювання та плакування вибухом, у тому числі, досліджено структури з'єднань, розглянуто теплову ситуацію в зоні утворення з'єднання; проаналізовано причини, що призводять до руйнування вже створених з'єднань, для чого досліджено процеси виникнення та взаємодії хвиль навантаження–розвантаження, а також роль залишкового тиску продуктів детонації. Було запропоновано нову модель фізичної теорії явища хвилеутворення. Комплекс досліджень, виконаних в ІЕЗ, став основою виділення окремого класу зварювальних процесів, які отримали назву конструкційного ЗВ, що виконується на деталях і виробках.

Спочатку для ЗВ використовувалися високобризантні ВР з високою швидкістю детонації, які зазвичай застосовувалися в кумулятивних зарядах і для створення сильних ударних хвиль. У цих умовах зварювання між пластинами спостерігалось лише у певному діапазоні початкових кутів і незмінно супроводжувалося значною залишковою деформацією поверхневих шарів металу з характерною хвилеподібною формою.

Особливим досягненням слід вважати створення подовжених зарядів (ПЗ), розроблення безпечної технології їх виготовлення та застосування для зварювання і різання металевих конструкцій.

У 1960–1970-х роках в ІЕЗ розроблено способи локального та шовного зварювання еквідистантно розташованих тонкостінних деталей, листів і замкнутих оболонок за допомогою подовжених зарядів, які начинені ВР з високою швидкістю детонації. На основі цих способів створено промислову технологію зварювання вибухом алюмінієвих оболонок кабелів зв'язку, яка відразу ж була впроваджена при будівництві кабельних ліній зв'язку загальною довжиною понад 5000 км. ЗВ застосовувалось для з'єднання потужних струмопроводів і струмопровідних елементів. Розроблено та впроваджено на Південно-Західній залізниці та інших 12 залізницях СРСР кілька ефективних способів з'єднання багатожильної арматури контактних мереж і технологію приварювання мідних з'єднувачів до об'ємно-загартованих рейок.

З 1970-х років посилюються дослідження фізико-механічних явищ при обробці металів вибухом, включаючи зварювання й різання, зміну їх фізико-механічних властивостей. Розроблено теорію й промислові технології обробки вибухом зварних з'єднань металоконструкцій відповідального

призначення для забезпечення їх експлуатаційної надійності, зокрема для підвищення корозійно-механічної міцності зварних з'єднань в основних і кислих середовищах (В.М. Кудінов, В.Г. Петушков). За допомогою ЗВ плоских поверхонь одержують біметалеві та багатошарові листи, здійснюють плакування спеціальними сплавами великогабаритних виробів (лопатей гідротурбін, конструктивних елементів реакторів тощо), з'єднують елементи металевих конструкцій.

У 1979 р. досліджено механізм детонації великомасштабних зарядів вибухової речовини стосовно плакування зварюванням вибухом. Встановлено пульсуючий режим детонації, запропоновано способи стабілізації процесу детонації. Розроблено технологію приєднання відводів до діючих магістральних газопроводів із використанням біметалічного перехідника (В.М. Кудінов). Вивчено умови утворення з'єднань поблизу нижньої межі ЗВ. Результати цих досліджень використовуються для розробки технологічних режимів ЗВ, які мінімізують вплив ЗВ при зварюванні елементів готових металоконструкцій, які чутливі до рівня залишкових пластичних деформацій та піддаються ризику руйнування. Визначено вплив відмінностей густини та твердості при з'єднанні різнорідних матеріалів. Вивчено вплив шорсткості поверхонь, що з'єднуються, і сформульовані рекомендації щодо раціонального вибору ступеня чистоти їх механічної обробки. Відпрацьовано прийоми хімічної підготовки поверхонь, що з'єднуються, при зварюванні високоміцних алюмінієвих сплавів зі зниженою здатністю до високошвидкісного пластичного деформування. Показано, що попередня хімічна обробка дозволяє з'єднувати ці сплави безпосередньо, без проміжних прошарків із більш пластичного металу.

Високими техніко-економічними показниками відрізняється технологія ЗВ сталеалюмінієвих перехідників для анодотримачів електролізерів для виплавки алюмінію. За допомогою цієї технології на Усольському заводі гірничого обладнання безпосередньо в цехових умовах організовано великосерійне виробництво сталеалюмінієвих перехідників. Завдяки застосуванню механізованої вибухової камери, технологічний цикл зварювання вибухом одного виробу становить 5 хв. На Красноярському алюмінієвому заводі організовано відкриту вибухову ділянку реставрації сталеалюмінієвих анодотримачів продуктивністю 10 тис. штирів на рік.

Прикладом ефективного застосування зварювання та різання вибухом є комбінована технологія під'єднання відводів до газопроводів під тиском, що забезпечує безпечне проведення робіт без припи-

нення транспортування газу. Зварювання та різання вибухом може здійснюватися в польових умовах, де складно застосовувати інше стандартне або громіздке устаткування. Здійснюється з'єднання в польових умовах приводів і вузлів контактної мережі, алюмінієвих кабелів, струмопідводів та ін. деталей.

У 1980-х роках розроблено принципово нові технологічні схеми та конструкції оснастки, що забезпечують локальне плакування вибухом оболонок у будь-яких просторових положеннях. Розроблено технологію ремонту локальних пошкоджень – наскрізних отворів з тонкими стінками (В.М. Кудінов та ін.).

У 1970–1980-х рр. Дослідне виробництво СКТБ ІЕЗ виготовило та поставило на адресу підприємств нафтової та газової промисловості (Ташкентська, Тюменська та Куйбишевська обл., Чорнобильська АЕС) подовжені кумулятивні заряди (ПКЗ) для різання вибухом трубопроводів та ін. конструкцій. Для виготовлення вузлів ракетних двигунів, систем подачі палива, аеродинамічних систем керування, перехідних відсіків та ін. вузлів із біметалу на Південному машинобудівному заводі було створено спеціальний цех. В ІЕЗ виготовлені підводні заряди для різання конструкцій глибоководних стаціонарних платформ при установці їх на акваторії Каспійського моря на глибині 120 м.

У 1979 р. при ІЕЗ створено Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з металообробки вибухом, нині – Науково-інженерний центр «Металообробка вибухом» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України – НІЦ МВ, яке очолив Л.О. Волгін. НІЦ

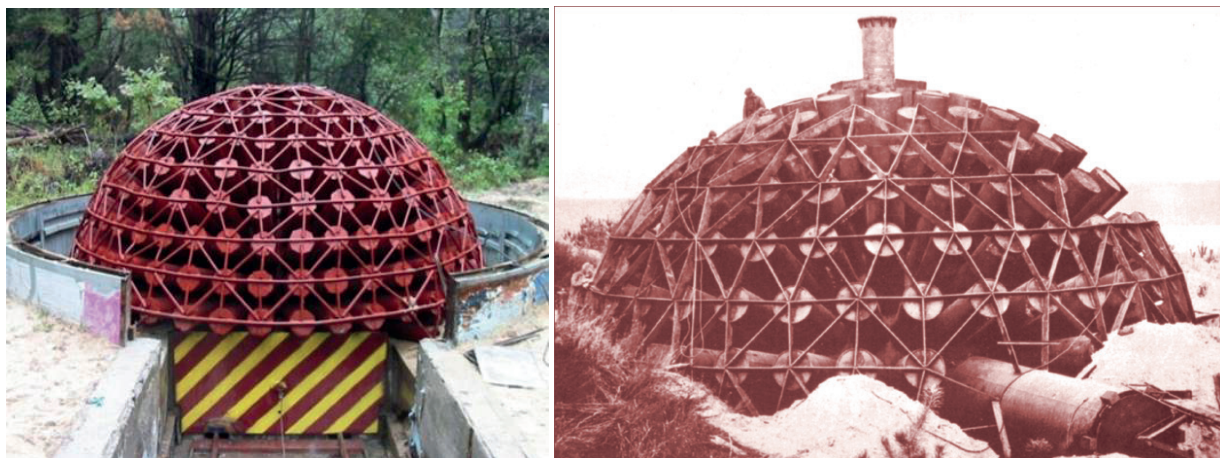
МВ по праву відносять до наукових об'єктів, що становлять національне надбання України.

Найважливішими роботами, виконаними Л.О. Волгіним і під його керівництвом, є: розробка технології зварювання вибухом триметалевих перехідників для аерокосмічної техніки; розробка труборізів на основі ПКЗ для демонтажу нафтопроводів, для вирізки ділянки труби з нафтопроводу в аварійній ситуації, для підключення відводів до діючих нафто- і газопроводів, для демонтажу під водою морських стаціонарних платформ тощо. Розроблено та впроваджено системи для аварійного відділення лопатей вертольота при катапультуванні екіпажу, для руйнування скління кабін пілота при покиданні екіпажем літальних апаратів у аварійних ситуаціях, для екстреного відокремлення «чорного ящика» від літального апарата у випадку аварії, а також технології для утворення аварійних виходів у космічному кораблі багаторазового використання в комплексній системі аварійного порятунку екіпажу. Спільно з Міністерством цивільної авіації та Київським авіаційним заводом ім. О.К. Антонова розроблено бортові пристрої та технологію застосування ВР для руйнування скління кабіни літальних апаратів і для утворення аварійних виходів у літаках різних типів (враховувався допустимий фізіологічний рівень звукового імпульсу шуму 150 Дб).

З 1990-х років одним з основних напрямків наукової діяльності ІЕЗ було підвищення циклічної довговічності зварних з'єднань обробкою вибухом. Було розроблено уявлення про механізм впли-



Стандартні кумулятивні заряди (лінійний та кільцевий) та перфоратор для нафтогазової промисловості



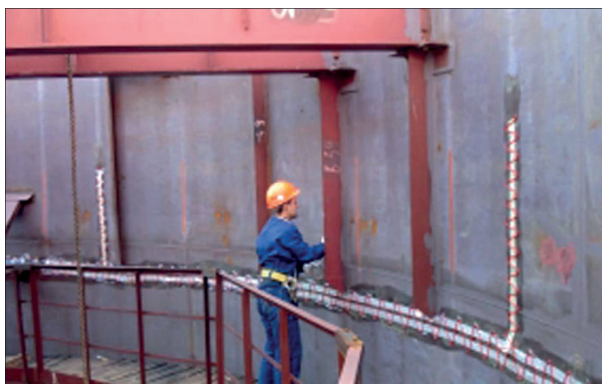
Камери для виконання робіт за технологіями ЗВ; праворуч – трубчаста камера потужністю 200 кг тротилу

ву обробки вибухом на довговічність зварних з'єднань, способи призначення режимів обробки та їх практичної реалізації (В.О. Титов). Технологія обробки зварних з'єднань вибухом успішно використовувалась при виготовленні прогінних споруд, ободів коліс великовантажних самоскидів Белаз, поворотного механізму радіотелескопа з діаметром дзеркала 70 м, при усуненні дефектів форми резервуарів для нафтопродуктів тощо.

У 1999–2003 рр. виявлено явище різкого зниження схильності зварних з'єднань алюмінієвого сплаву В95 до крихких руйнувань в умовах низькотемпературного підігріву, що дало можливість виконати плакування вибухом зварних з'єднань з тріщиноподібним концентратором (В.Г. Петушков). У 2008 р. виявлено ефект запобігання розтріскуванню та покращенню зварюваності при зварюванні вибухом високовуглецевих сталей підвищеної твердості (наприклад 65Г) з різними металами та сплавами з використанням низькотемпературного (до 150 °С) попереднього підігріву. Цей ефект дозволяє за допомогою ЗВ отримувати з'єднання металів і сплавів, які мають низьку пластичність (Л.Д. Добрушин).

ЗВ застосовують при виготовленні трубних дощок теплообмінників і трубчастих перехідників для енергетики та ракетобудування. Корпуси парогенераторів виготовляють із перлітних сталей, а трубки та колектори – із аустенітної корозійностійкої сталі. Для виготовлення складних конструкцій цих вузлів АЕС розроблено технології вибухового розвальцювання та наступного приварювання дугою в інертних газах.

Протягом багатьох років в ІЕЗ займалися проблемами безпеки та екологічної чистоти вибухових технологій. Було розроблено декілька конструкцій вибухових камер. ЗВ виконують у пристосованих звукопоглинаючих приміщеннях (на майданчиках, у басейнах, камерах) або під піною в певному діапазоні швидкостей і кутів співударяння. У НІЦ МВ діє вибухова камера, в якій проводяться



Робочий момент обробки вибухом декомпозера

вибухові роботи та яка розрахована на підрив до 200 кг ВР у тротиловому еквіваленті. У ній можна виготовляти біметалеві вироби різних габаритів і конфігурації (В.М. Кудінов, В.Г. Петушков, Л.О. Волгін). Як вибухову речовину найчастіше застосовують амоніти, амонали, гранулотол тощо.

У 2011 р. в ІЕЗ розроблено технологію квазістикового ЗВ трубок із мідного сплаву CuCrZr та нержавкої сталі 321 для виготовлення біметалічного перехідника, що дозволяє з'єднувати різнорідні матеріали за допомогою зварювання плавленням (Л.Д. Добрушин, С.Ю. Ілларіонов, П.С. Шльонський). Дана технологія розроблялась для проекту «Міжнародний експериментальний термоядерний реактор», так званий ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

Пізніше, у 2014–2016 рр., в ІЕЗ було розроблено конструкцію і технологію виготовлення за допомогою ЗВ триметалевого перехідника Ti-SS-Ti. Всередині цього перехідника робився отвір, в який вварювали за допомогою електронно-променевого зварювання патрубків із ніобію. Таким чином вдалося з'єднати резонатор із ніобію з кожухом із нержавкої сталі для проекту «Міжнародний лінійний колайдер», або скорочено ILC (International Linear Collider); виконавці – С.Ю. Ілларіонов, П.С. Шльонський, А.Г. Бризгалін.

1. US patent 3137937, Cowan, George R.; Douglass, John J.; Holtzman, Arnold H., Explosive bonding, issued 1964-06-23
2. Кудінов В.М. (1971) Гидродинамическое моделирование процесса образования волн при сварке металлов взрывом. *Автоматическая сварка*, **8**, 71–76.
3. Кудінов В.М. (1978) *Сварка взрывом в металлургии*. М., Металлургия.
4. Дерibas А.А. (1972) *Физика упрочнения и сварки взрывом*. Новосибирск.
5. Волгін Л.А. (1980) *Способы и технологические средства замены поврежденных участков магистральных трубопроводов*. М., ЭНГ.
6. Кудінов В.М., Петушков В.Г., Фадеев Ю.И. (1993) *Обработка взрывом сварных соединений металлоконструкций*. М., Металлургия.
7. Петушков В.Г. (2005) *Применение взрыва в сварочной технике*. К., Наукова думка.
8. Добрушин Л.Д., Корнієнко О.М. (2010) *Зварювання вибухом* / *Енциклопедія сучасної України* [Електронний ресурс] / редкол.: І.М. Дзюба [та ін.]; НАН України, НТШ. Київ, Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, Т. 10. ISBN 978-966-02-5721-4.
9. Шмиг Р.А., Боярчук В.М., Добрянський І.М., Барабаш В.М. (2010) *Зварювання вибухом. Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури*. За заг. ред. Р.А. Шмига. Львів, ISBN 978-966-7407-83-4.

Олександр Корнієнко, д.і.н.,

ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Леонід Полонський, д.т.н.,

Державний університет «Житомирська політехніка»