

Тарасов О. Ф.
Касьянюк О. С.
Грибков Е. П.
Бабаш А. В.
Коваленко А. К.

ПРОЕКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЮ УСТАНОВКОЮ ДЛЯ ПРОЦЕСУ КРУЧЕННЯ ПІД ВИСОКИМ ТИСКОМ ПОРОЖНИСТИХ ЗАГОТОВОК

Розвиток промислових підприємств та впровадження технологій інтернету речей у виробництві вимагають створення нових механізмів, для розробки яких необхідно використання сучасних компонентів з подальшим точним комп'ютерним керуванням процесом. В області обробки металів тиском такими механізмами можна вважати установки для кручення під високим тиском (КВТ, high pressure torsion, HPT), оскільки цей процес набуває поширення завдяки отримуванию субмікроскопічної структури в заготовці та надзвичайно високої міцності матеріалу в результаті обробки. В той же час використання установок КВТ має суттєві обмеження, які обумовлюються значною кількістю параметрів, які можуть змінюватись нелінійно під час процесу деформації. Проблеми керування установкою вирішуються завдяки використанню автоматизованої систем керування (АСК) параметрами технологічного процесу. В статті наведена сутність нового процесу деформації порожнистих заготовок за допомогою кручення під високим тиском. Наведений опис експериментальної установкою та використаних елементів керування. Цей технологічний процес представлено множинами подій та діяльностей, зв'язок між якими відображено у вигляді циклограми. На основі аналізу представленого технологічного процесу розроблена система моніторингу та АСК установкою. Розроблена логічна схема АСК, діаграма визначення складу установкою з АСК для реалізації технології КВТ та діаграма компонентів її програмного комплексу. Представлено схемне рішення використання частотного перетворювача для приведення до руху механізму кручення. Для точного підрахування числа обертів механізму кручення використаний інкрементальний енкодер фірми Siemens та налагоджувальна плата STM32F4Discovery. Використання частотного електроприводу дозволило підвищити ефективність керування установкою. Розробка та використання подібних АСК для інших установок для обробки металів тиском дозволить гарантувати стабільний технологічний процес і необхідні фізичні властивості заготовок.

Ключові слова: кручення під високим тиском, порожниста заготовка, установка, моніторинг, автоматизована система керування.

Однією з найбільш актуальних проблем галузей машинобудування і авіабудування є збільшення надійності деталей і термінів їх роботи. Створення деталей з поліпшеними характеристиками надійності та довговічності вимагає проведення експериментів з різними матеріалами та методами їх формозміни та удосконалення процесів обробки матеріалів тиском (ОМТ). Необхідність створення нових матеріалів з характеристиками, що поєднують комплекс оптимальних властивостей та працюють у екстремальних умовах, призвела до розвитку процесів виготовлення матеріалів з субмікроскопічною структурою (СМК) [1, 2]. Для цього використовуються спеціальні схеми деформування, які дозволяють за низьких температур досягати великих пластичних деформацій зсуву. Найбільшого поширення набули два методи інтенсивної пластичної деформації (ППД - severe plastic deformation, SPD): кручення під високим тиском і рівноканальне кутове пресування [1, 3].

Серед величезної різноманітності методів ППД, доступних в даний час, кручення під високим тиском (КВТ, high pressure torsion, HPT) є методом досягнення максимального впливу на структуру та механічні характеристики матеріалу [4]. Кручення під високим тиском [5] є одним з методів ОМТ, в процесі якого заготовки піддаються стисненню та одночасному крученню. Важливою особливістю процесу є значний гідростатичний тиск, що перешкоджає розтріскуванню під час деформації і майже не призводить до обмеження деформації, що застосовується. Незважаючи на те, що фундаментальні принципи цього процесу були запропоновані ще в 1935 році, обробка КВТ набула великого значення лише протягом останніх 20 років [3], коли було визнано, що цей процес деформування дає можливість отримувати СМК структуру в заготовці та досягати надзвичайно високої міцності матеріалу. Отже, цей метод також дозволяє використовувати ППД для матеріалів середньої та високої міцності навіть за низьких

температур. Більш того, метод КВТ досить простий для реалізації, що робить його надійним та економічним у порівнянні з іншими процесами ПД. Але метод КВТ не має поширеного застосування, тому що розміри і форма деталі обмежені схемою деформування. Зміна схеми деформування при КВТ шляхом переходу до іншого типу заготовок забезпечує розширення технологічних можливостей процесу впливу на заготовку з метою її формозміни, отримання СМК структури і підвищених механічних характеристик.

Процес використовують для деформування надміцних сплавів на основі алюмінію, титану, магнію, створенні композитів та інших архітектурних матеріалів. Наприклад, в роботі [4] продемонстровано виготовлення з нанодроти Nb_2O_5 і порошку Al нового нанокompозиту з металевою матрицею з суттєво покращеною міцністю відносно чистого Al. Системи для яких потрібен високий рівень надійності потребують якості матеріалу та його службових властивостей, наприклад, високої електропровідності [6]. В цій роботі представлено використання технологій порошкової металургії та КВТ для виготовлення надміцного пластичного нанокompозиту Cu та Cu-CNT для виробництва міцних, провідних і пластичних композитів з металевою матрицею. Медична та авіаційна промисловості потребують якісних та міцних виробів з алюмінієвих, титанових та інших сплавів. В роботі [7] представлено розробку нового матеріалу з цих сплавів за допомогою КВТ. В роботі [8] показано покращення матеріалу з сплаву TiAlFeCoNi з використанням технологічного процесу КВТ для створення якісних виробів медичного призначення.

Однак перспективи використання КВТ як промислового методу мають суттєві обмеження. Це зумовлено малими розмірами оброблюваних заготовок і низькою стійкістю інструменту внаслідок надзвичайно високих навантажень на нього. Ще однією проблемою використання КВТ є керування та моніторинг великої кількості параметрів, які можуть змінюватись нелінійно під час процесу деформації. Цю проблему може вирішити АСК установки для проведення технологічного процесу КВТ, яка розглядається в даній роботі.

Одночасно, розвиток та вдосконалення промислового виробництва потребує безперервного збільшення продуктивності машин та агрегатів, підвищення якості продукції, зниження собівартості. Це можливо на основі створення нового технологічного обладнання для реалізації нових сучасних технологій. Для більш якісного керування технологічним процесом необхідні системи для контролю і управління установками, які використовуються для його реалізації. Ефективний контроль неможливий без впровадження сучасних систем управління, як автоматизованих, так і автоматичних, які працюють без участі людини-оператора. Особливо це актуально, коли є велика кількість параметрів для керування в процесі деформування.

Для нової установки кручення під високим тиском порожнистих заготовок (КВТ ПЗ) необхідно реєструвати кінематичні параметри інструменту та параметри силового впливу на заготовку та керувати процесом деформування: коригувати силу деформації, момент і швидкість кручення інструменту залежно від необхідної форми і властивостей заготовки. Автоматизація технологічного процесу дозволить отримувати показники з датчиків та коригувати параметри навантаження заготовки. Це також дозволить налаштувати нелінійні режими деформування для кращого формування СМК структури матеріалу заготовки.

Важливою частиною установки є електропривод, який повинен забезпечувати необхідний для технології режим роботи. Застосування сучасних комплектних електроприводів, а також досягнення в мікропроцесорній техніці робить можливим застосування різних законів керування асинхронним електродвигуном для виконання певних задач виробництва та автоматизації.

Технологічний процес пресування з одночасним крученням вимагає забезпечення точної кількості обертів механізму кручення. Для вирішення даної задачі необхідно розробити систему керування механізму кручення зразку при його одночасному пресуванні на основі сучасного комплектного електропривода, який здатний забезпечити необхідну точність позиціонування. Для підрахунку кількості обертів механізму кручення використовується мікропроцесорний комплекс, а саме налагоджувальна плата STM32F4Discovery [9].

Таким чином, завдяки автоматизації керування обладнанням можливо в реальному часі змінювати вихідні параметри заготовки для різного майбутнього застосування. При цьому, автоматизація керування дозволить зменшити вплив людського фактору на процес деформування та зменшити кількість помилок.

Комп'ютери та програмне забезпечення активно використовуються при автоматизації технологічних процесів для зберігання інформації, розрахунків за типовими методиками, підготовки текстової та графічної документації. Необхідність скорочення термінів та підвищення якості проектування призвела до появи програмних продуктів, що дозволяють швидко аналізувати та корегувати технологічні процеси на автоматизованих робочих місцях. Постійно удосконалюється концепція об'єднання систем автоматизованого проектування, підготовки виробництва та автоматизації самого виробництва. У ній результати автоматизованого проектування перетворюються на програми автоматизованого керування технологічним обладнанням та контролю якості. Мережева передача результатів проектування та технології створення інформаційних двійників у виробництві дозволила прискорити процес виконання замовлень.

Для якісної розробки автоматизованої системи керування (АСК) використовується технологія MBSE [10], основана на загальних принципах системної інженерії, візуальні засоби опису систем, такі як мова моделювання систем (systems modeling language, SysML) та уніфікована мова моделювання (unified modeling language, UML) для розробки програмного забезпечення [11, 12]. SysML є предметно-орієнтованою мовою моделювання систем. Вона підтримує визначення, аналіз, проектування, перевірку та підтвердження відповідності широкого спектру систем. SysML спочатку розроблявся в рамках проекту специфікації з відкритим вихідним кодом і має відкриту ліцензію для поширення та використання. Як мова, SysML є розширенням частини мови UML. UML є мовою широкого профілю, це відкритий стандарт, що використовує графічні позначення для створення абстрактної моделі системи. UML був створений для визначення, візуалізації, проектування та документування програмних систем. Наприклад, в роботі [11] представлено моделювання стратегії перемикачів передачі і керування системи на основі SysML та проведено аналіз системних вимог, проектування та наведена розробка структурних моделей, моделі поведінки та інші моделі. Таким чином, функціональність результатів проектування перевіряється на більш ранній стадії життєвого циклу розробки продукту. Переваги використання SysML для проектування складних систем для промисловості представлено також в роботі [13], де описано сучасний стан аналізу безпеки системи на основі моделей (model-based safety analysis, MBSA) та продемонстровано адаптації його до сучасного рівня техніки, які включають пропозицію щодо інтеграції дерев несправності компонентів (component fault trees, CFT) з внутрішніми блок-схемами та діаграмами діяльності SysML.

Разом з АСК реалізації технологічного процесу повинна використовуватися система моделювання для розробки технології, проектування технологічного оснащення. Одним із сучасних засобів моделювання є багатофункціональна CAE-система Abaqus [14]. Abaqus являє собою набір програмного забезпечення для моделювання технологічного процесу за допомогою методу скінченних елементів. Продукти Abaqus використовуються з відкритим вихідним кодом мови програмування Python для різних сценаріїв програмного налаштування процесу моделювання та імпорту отриманих результатів.

Метою даної роботи є створення автоматизованої системи керування новим обладнанням для деформування порожнистих заготовок крученням під тиском, що дозволить збільшити міцність виробів та зменшити ймовірність помилок в процесі деформування на основі зменшення впливу людини на технологічний процес. Автоматизація також дасть можливість керувати багатьма параметрами процесу та корегувати роботу обладнання в реальному часі при нелінійній зміні цих параметрів по ходу деформування.

В цій роботі розглянуто проектування і реалізація АСК нової експериментальної установки, призначеної для проведення технологічного процесу деформування порожнистих заготовок крученням під високим тиском. Запропонований спосіб дозволяє із заготовок у вигляді шайби виробляти заготовки конічної форми зміцнюючи матеріал для більшої надійності майбутнього виробу, наприклад циліндричної втулки. На основі аналізу існуючих схем для КВТ

була розроблена схема технологічного процесу для порожнистих заготовок КВТ ПЗ, яка потребує дослідження поведінки металу в процесі пластичного деформування [15]. Схема деформування наведена на рисунку 1 у вигляді послідовних зображень стадій технологічного процесу отримання конічних заготовок.

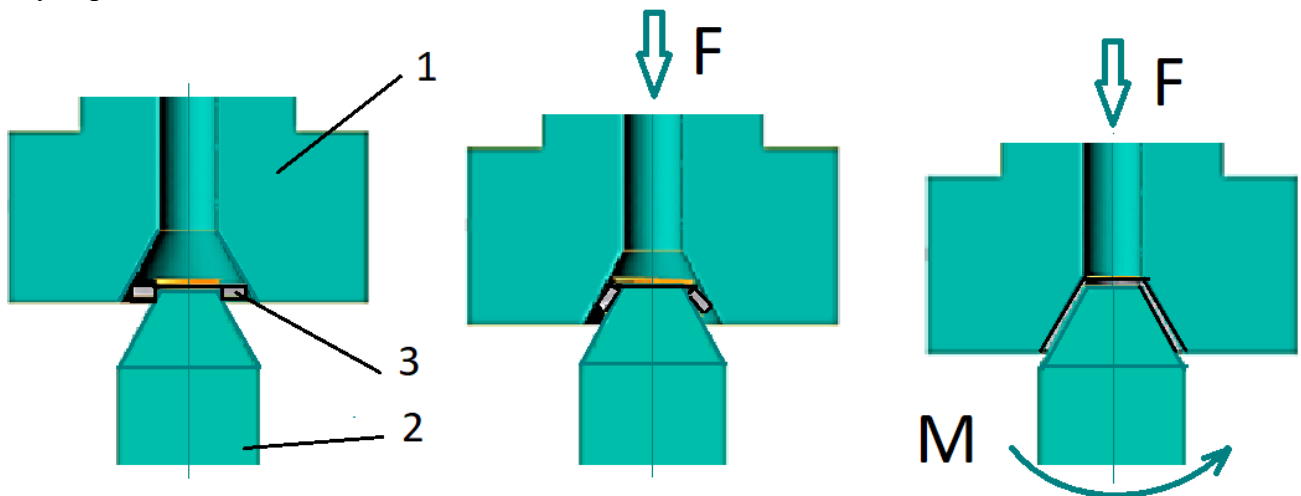


Рис. 1. Зображення трьох послідовних стадій технологічного процесу отримання конічних заготовок:

1 – матриця, 2 – пуансон, 3 – заготовка

Для цього технологічного процесу потрібна установка, яка буде створювати тиск одного інструмента - матриці на заготовку та механізм для обертів іншого інструмента - пуансона для створення зсувних деформацій на поверхні заготовки під час її деформації. При контролі технологічного процесу потрібно фіксувати силу тиску та частоту обертів редуктору, а також проводити налаштування пресової частини та швидкості обертів валу редуктору для коректного протікання процесу деформування. Зовнішній вигляд створеної установки наведений на рисунку 2.

Експериментальна установка включає зварну раму 1, на якій встановлений натискний гідроциліндр 2 зусиллям 100 кН, електродвигун 3 АИР 71-В2 потужністю 700 Вт, зубчаста муфта 4, нижній пуансон 5 та матриця 6. Крутний момент передається через черв'ячний редуктор 7 2Ч-80 з передаточним числом 40, контроль обертів проводить інкодер 8. Матриця 6 встановлена на верхній плиті 9. Черв'ячний редуктор встановлений на нижній плиті 10. Момент на валу редуктора передається на шліцьовий вал 11. Навантаження гідроциліндра 2 передається на підп'ятник 12 та упорний шарикопідшипник 13 серії 8117.

Також для вимірювання сили пресування було застосовано месдозу кільцевого типу, для контролю деформації заготовки – датчик лінійних переміщень BALLUFF BTL5-A11-MO200-P-S32, для вимірювання куту кручення заготовки – інкодер Siemens 6FX2001-2DB02. Всі вимірювальні пристрої були підключені до АЦП.

Датчики, які використовуються в установці в процесі моніторингу та проведенню цих процесів основними є параметри на рисунку 3.

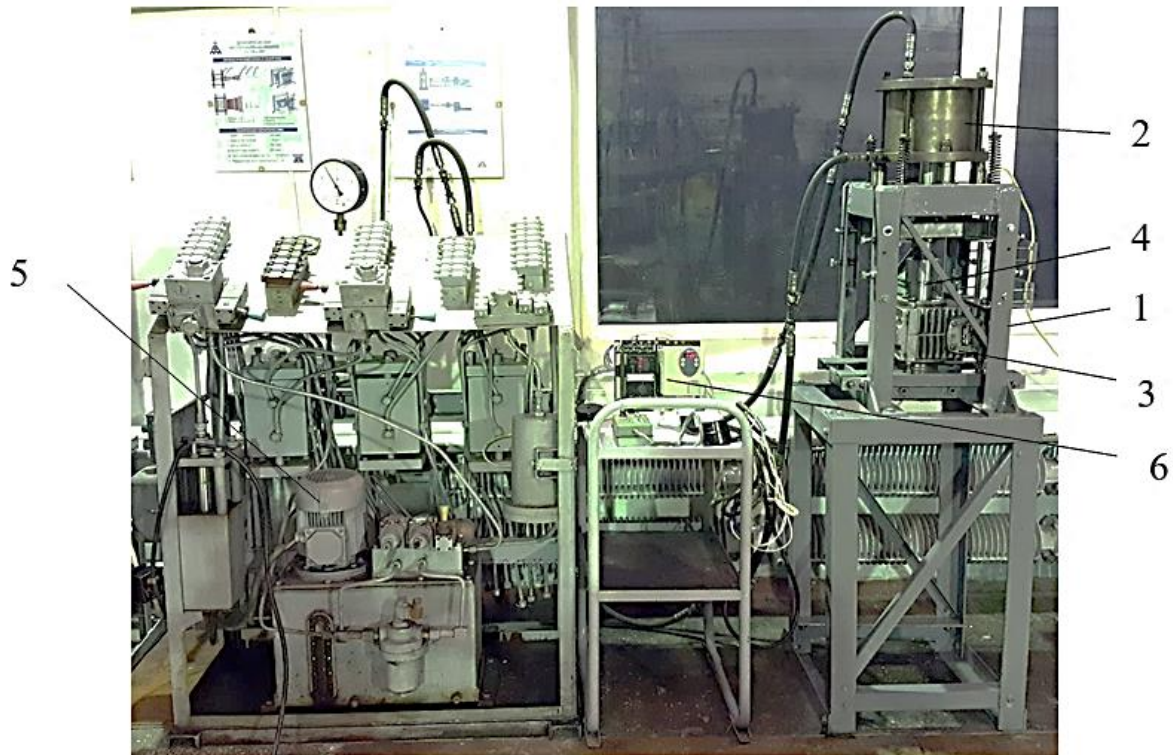


Рис. 2. Зовнішній вигляд установки:

1 – рама; 2 – гідроциліндр; 3 — редуктор; 4 – штамп; 5 – гідростанція; 6 – АСК

Першим етапом пропонованого в роботі процесу КВТ ПЗ є запуск гідравлічної станції яка буде керувати натискним гідроциліндром та моніторингу тиску на верхній інструмент-матрицю. Гідроциліндр буде опускатися до зіткнення з заготовкою. Коли станеться дотик верхнього інструменту до заготовки почнеться другий етап.

На другому етапі запускається обертаючий редуктор, продовжується переміщення гідроциліндру до досягнення необхідного значення переміщення інструменту для виконання деформування до необхідної товщини заготовки. Одночасно запускається моніторинг кількості обертів нижнього пуансону і температури заготовки. Коли буде досягнуто необхідне значення переміщення гідроциліндру почнеться третій етап.

Третій етап починається з зупинки матриці і відключенні обертаючого редуктору, завершується моніторинг тиску, кількості обертів і температури та виконується переміщення гідроциліндру до початкового положення.

Алгоритм управління цим технологічним процесом може бути заданий графом переходів кінцевого автомата з подальшою декомпозицією (розподілом по процесорах).

Для експерименту по виготовленню заготовок кінчної форми можливо виділити наступні діяльності і події, які наведені в таблиці 1, що представляє циклограму процесу:

- $Activities = \{A_1, \dots, A_9\}$;
- $(Events = \{a, b, d, e\})$.

де

- a) Запуск роботи установки;
- b) Дотик матриці до заготовки;
- c) Виконано необхідне переміщення гідроциліндру;
- d) Завершення роботи установки.

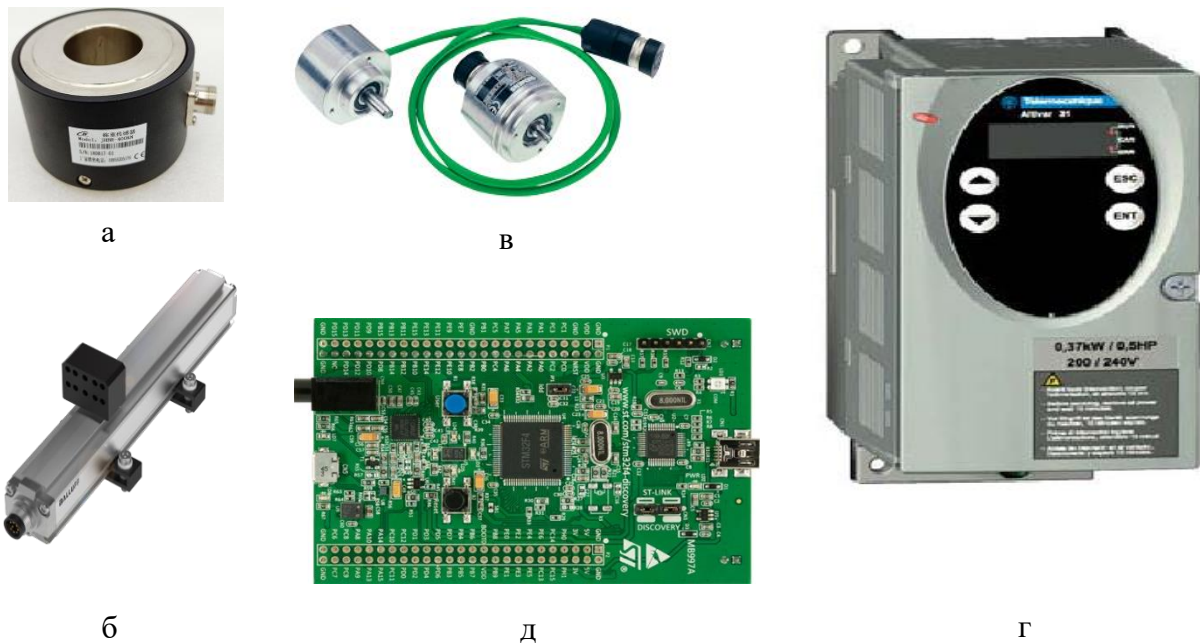


Рис. 3. Обладнання, яке використовується в системі управління установки:
 а – месдоза кільцевого типу, б – датчик лінійних переміщень BALLUFF BTL5-A11-MO200-P-S32, в – інкрементальний енкодер Siemens 6FX2001-2DB02 з роздільною здатністю 1024 імпл./об., г – частотний перетворювач Altivar 31 ATV31HU15N4, д – плата STM32F4DISCOVERY

Таблиця 1
 Циклограма для процесу по виготовленню порожнистих заготовок конічної форми

	a	b	c	d
1 Керування переміщенням циліндру пресу вниз до дотику з матрицею				
2 Керування переміщенням циліндру пресу вниз в процесі деформування				
3 Запуск і оберти редуктору				
4 Переміщення циліндру пресу вверх				
5 Зупинка редуктору				
6 Моніторинг тиску				
7 Моніторинг кількості обертів				
8 Моніторинг температури				
9 Вимкнення приводу установки				

Складність контролю технологічного процесу людиною та необхідність чіткого контролю товщини майбутньої заготовки підтверджує необхідність проектування АСК для запропонованого процесу КВТ ПЗ. Для опису складу установки з АСК розроблена діаграма визначення блоків SysML, яка представлена на рисунку 4.

На основі циклограми, представленої в таблиці 1, зробимо опис функціональних взаємодій елементів системи за допомогою логічної структурної схеми, наведеної на рисунку 5.

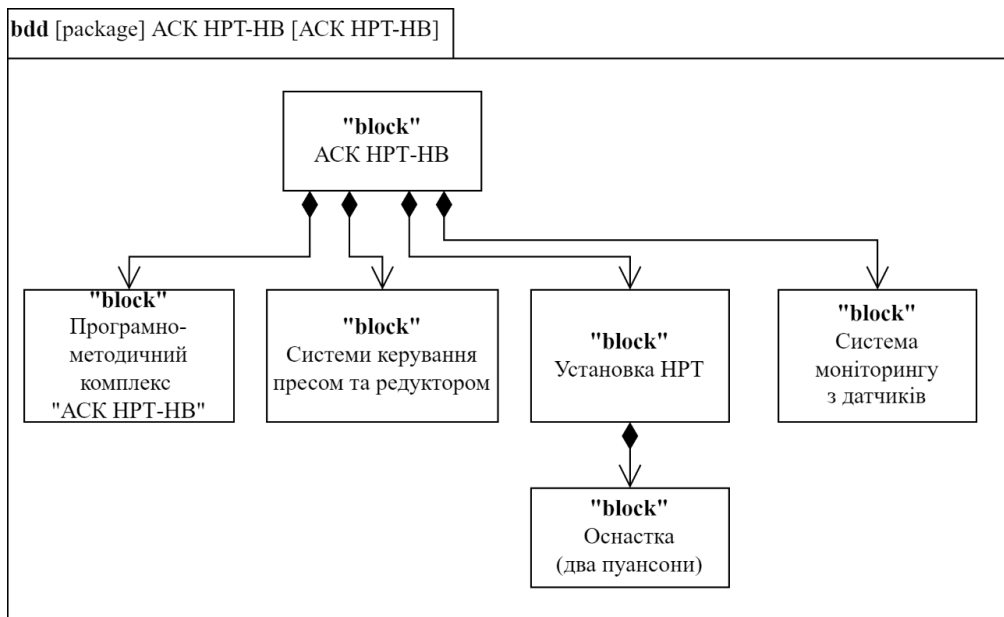


Рис. 4. Діаграма визначення блоків складу установки з АСК для реалізації технології КВТ ПЗ

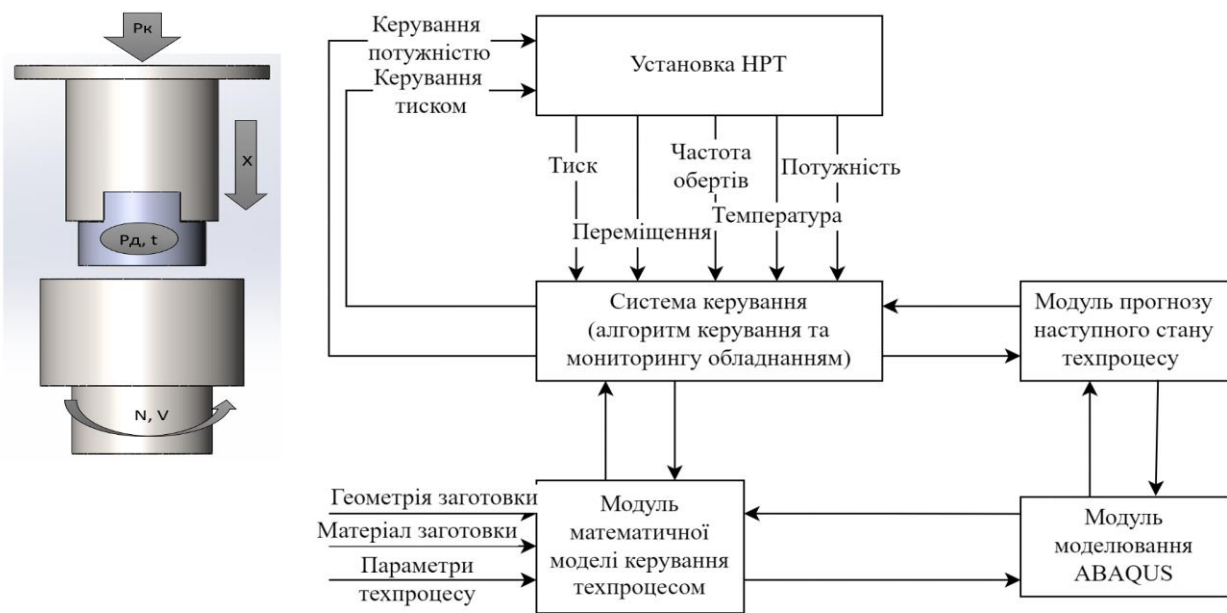


Рис. 5. Логічна схема АСК установкою для процесу КВТ ПЗ

На діаграмі наведені параметри установки, які необхідно контролювати у часі. Найвні зв'язки дозволяють виконувати деформування з використанням різних сукупностей параметрів пресової і обертової частин установки. На основі аналізу сформульовані наступні основні вимоги до програмного комплексу АСК установкою для деформування конічних заготовок з крученням під тиском:

- ПК повинен мати модуль для керуванням всім обладнанням, яке застосовується в експериментах;
- ПК повинен мати модуль для фіксації даних з датчиків, які необхідні для проведення експерименту;
- ПК повинен мати модуль контролю проведення експерименту, який буде спостерігати за послідовністю технологічних операцій в експерименті та корегувати його налаштування;

– ПК повинен відображати поточний стан експерименту: опис операції, дані з датчиків та інструкції для приводів обладнання.

За цими вимогами до програмного комплексу спроектовано діаграму компонентів, яка представлена на рисунку 6.

Для включення та забезпечення необхідної кутової швидкості асинхронного двигуна, який використовується для приведення до руху пуансона експериментальної установки, використовується частотний перетворювач Altivar 31 ATV31HU15N4 потужністю 1,5 кВт [16].

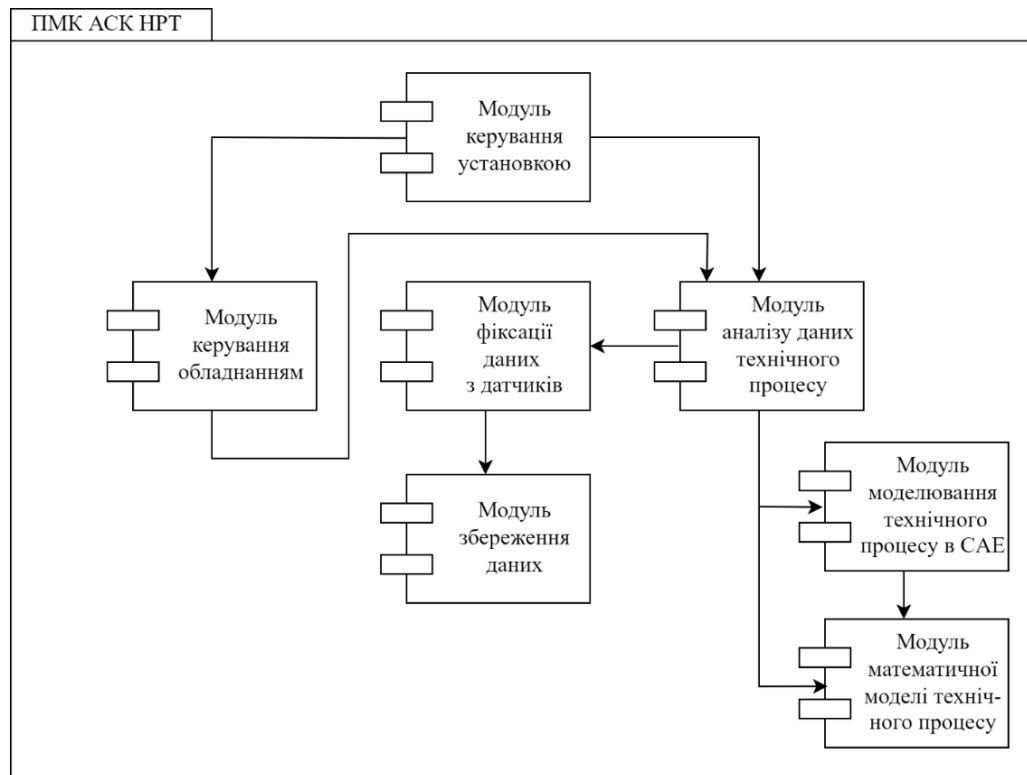


Рис. 6. Діаграма компонентів для програмного комплексу АСК

Програмування перетворювача частоти здійснювали шляхом зміни його параметрів: частота комутації, тривалість розгону, номінальна частота живлення двигуна, закон управління двигуном, призначення логічного входу і т. п. Кожен з таких параметрів має код і ряд значень. Для обробки імпульсів з датчика швидкості з подальшим підрахунком числа обертів механізму кручення використовувався принцип захоплення-порівняння, реалізований з використанням налагоджувального комплексу STM32F4Discovery. Для керування пуском та зупиненням електроприводу механізму кручення при досягненні необхідного числа обертів був використаний розроблений додаток з використанням мови програмування C#.

Розроблена система керування дозволила реалізувати керування установкою і отримання експериментальних заготовок необхідної якості.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз існуючих схем та областей застосування технологічного процесу деформування методом кручення під високим тиском з описом перспектив та недоліків даного процесу у виробництві та аналіз розвитку методів проектування АСК показав необхідність створення такої системи.

2. Представлений новий процес отримання порожнистих заготовок за допомогою експериментальної установки при деформації крученням під високим тиском дозволить отримувати заготовки конічної або навіть циліндричної форми, які будуть мати субмікроскопічну структуру. Проблемою використання КВТ є моніторинг та керування значною кількістю параметрів, які можуть змінюватись нелінійно під час процесу деформації.

3. Спроектвана SysML діаграма визначення блоків, яка описує складові установки з АСК для КВТ ПЗ, логічна схема АСК для опису взаємодії елементів цієї системи та UML діаграма компонентів, яка відображає основні модулі програмного комплексу для АСК.

4. Реалізована АСК КВТ ПЗ, яка дозволяє забезпечити необхідне керування приводами установки в процесі деформування заготовки. Отримані експериментальні заготовки необхідної якості.

5. Для точного підрахування числа обертів механізму кручення була використана налагоджувальна плата STM32F4Discovery. На її базі розроблено та реалізовано схемне та програмне рішення для здійснення вимірювання числа обертів. В залежності від числа потрібних обертів налагоджувальною платою здійснюється зміна стану її дискретного керуючого виходу. На цій основі здійснюється керування режимом роботи частотного перетворювача.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Segal V. Review: Modes and processes of severe plastic deformation (SPD). *Materials*. 2018. 11(7): 1175, C. 1–29. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11071175>
- 2 Li Y., Lu Z., Li T., Li D., Lu J., Liaw P. K., Zou, Y. Effects of surface severe plastic deformation on the mechanical behavior of 304 stainless steel. *Metals*. 2020. 10(6), C. 1–13. DOI: <https://doi.org/doi:10.3390/met10060831>
- 3 Edalati K., Horita Z. A Review on High-Pressure Torsion (HPT) from 1935 to 1988. *Materials Science and Engineering A*. 2016. 652. C. 325–352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.074>
- 4 Silva C., Montoro L. A., Martins D. A. A. et al. Interface structures in Al-Nb₂O₅ nanocomposites processed by high-pressure torsion at room temperature. *Materials Characterization*, 2020. 162: 110222, C. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110222>
- 5 Kawasaki M., Langdon T. G. Review: achieving superplasticity in metals processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Science*. 2014. 49(19). C. 6487–6496. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8204-5>
- 6 Akbarpour M. R., Mirabad H. M., Alipour S., Kim H. S. Enhanced tensile properties and electrical conductivity of Cu-CNT nanocomposites processed via the combination of flake powder metallurgy and high pressure torsion methods. *Materials Science and Engineering: A*. 2019. 773: 138888, C. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138888>
- 7 Bartkowska A., Bazarnik P., Huang Y., Lewandowska M., Langdon T. G. Using high-pressure torsion to fabricate an Al–Ti hybrid system with exceptional mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2021. 799: 140114. C. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140114>
- 8 Edalati P., Floriano R., Tang Y. et al. Ultrahigh hardness and biocompatibility of high-entropy alloy TiAlFeCoNi processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering: C*. 2020. 112: 110908. C. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110908>
- 9 Квашнін В. О., Бабаш А. В., Квашнін В. В. Програмування та застосування мікроконтролерів STM32F4Discovery: монографія. Краматорськ: ЦТPI “Друкарський дім”. 2017. 143 с. 978-6177415-30-4.
- 10 Henderson K., Salado A. Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature. *Systems Engineering*. 2021. 24(1). C. 51–66. DOI: <https://doi.org/10.1002/sys.21566>
- 11 Kumar A., Dhanwate S. SysML Based Modelling of Gear Shifting Strategy and Drivability for Automatic Transmission. *Journal of Physics Conference Series*. 2020. 1478: 012008. C. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1478/1/012008>
- 12 Munk P., Nordmann A. Model-based safety assessment with SysML and component fault trees: application and lessons learned. *Softw Syst Model*. 2020. 19. C. 889–910. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10270-020-00782-w>
- 13 Yoo S., Lee S., Kim S. et al. Integrating deep learning into CAD/CAE system: generative design and evaluation of 3D conceptual wheel. *Struct Multidisc Optim*. 2021. 64. C. 2725–2747. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02953-9>
- 14 Yuan W.-H., Wang H.-C., Zhang W., Dai B.-B., Liu K., Wang Y. Particle finite element method implementation for large deformation analysis using Abaqus. *Acta Geotechnica*. 2021. 16(8). C. 2449–2462. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01124-2>
- 15 Бабаш А. В., Квашнін В. О., Тарасов А. Ф., Грибков Е. П. Реалізація процесу інтенсивної пластичної деформації з використанням сучасного комплектного електропривода. *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій* : матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. 03–05 жовтня 2018 р. Запоріжжя : ЗНТУ. 2018. С. 168–170.
- 16 Казачковский Н. Н., Якупов Д. В. Программирование преобразователя частоты Altivar 31: Методические материалы для слушателей курсов повышения квалификации и студентов специальности 7.092203 «Электромеханические системы автоматизации и электропривод». Днепропетровск: учебный центр компании «Шнейдер Электрик». 2006. 45 с.

REFERENCES

- 1 Segal V. Review: Modes and processes of severe plastic deformation (SPD). *Materials*. 2018. 11(7): 1175, pp. 1–29. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11071175>

- 2 Li Y., Lu Z., Li T., Li D., Lu J., Liaw P. K., Zou, Y. Effects of surface severe plastic deformation on the mechanical behavior of 304 stainless steel. *Metals*. 2020. 10(6), pp. 1–13. DOI: <https://doi.org/doi:10.3390/met10060831>
- 3 Edalati K., Horita Z. A Review on High-Pressure Torsion (HPT) from 1935 to 1988. *Materials Science and Engineering A*. 2016. 652. pp.325-352. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.11.074>
- 4 Silva C., Montoro L. A., Martins D. A. A. et al. Interface structures in Al-Nb₂O₅ nanocomposites processed by high-pressure torsion at room temperature. *Materials Characterization*, 2020. 162: 110222, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110222>
- 5 Kawasaki M., Langdon T. G. Review: achieving superplasticity in metals processed by high-pressure torsion. *Journal of Materials Science*. 2014. 49(19). pp. 6487–6496. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8204-5>
- 6 Akbarpour M. R., Mirabad H. M., Alipour S., Kim H. S. Enhanced tensile properties and electrical conductivity of Cu-CNT nanocomposites processed via the combination of flake powder metallurgy and high pressure torsion methods. *Materials Science and Engineering: A*. 2019. 773: 138888, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138888>
- 7 Bartkowska A., Bazarnik P., Huang Y., Lewandowska M., Langdon T. G. Using high-pressure torsion to fabricate an Al–Ti hybrid system with exceptional mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*. 2021. 799: 140114. pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140114>
- 8 Edalati P., Floriano R., Tang Y. et al. Ultrahigh hardness and biocompatibility of high-entropy alloy TiAlFeCoNi processed by high-pressure torsion. *Materials Science and Engineering: C*. 2020. 112: 110908. pp. 1–10 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110908>
- 9 Kvashnin V.O., Babash A.V., Kvashnin V.V. Programming and application of STM32F4Discovery microcontrollers: monograph. Kramatorsk: CTRI "Printing House". 2017. 143 p. 978-6177415-30-4 (in Ukrainian).
- 10 Henderson K., Salado A. Value and benefits of model-based systems engineering (MBSE): Evidence from the literature. *Systems Engineering*. 2021. 24(1). pp. 51–66. DOI: <https://doi.org/10.1002/sys.21566>
- 11 Kumar A., Dhanwate S. SysML Based Modelling of Gear Shifting Strategy and Drivability for Automatic Transmission. *Journal of Physics Conference Series*. 2020. 1478: 012008. pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1478/1/012008>
- 12 Munk P., Nordmann A. Model-based safety assessment with SysML and component fault trees: application and lessons learned. *Softw Syst Model*. 2020. 19. pp. 889–910. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10270-020-00782-w>
- 13 Yoo S., Lee S., Kim S. et al. Integrating deep learning into CAD/CAE system: generative design and evaluation of 3D conceptual wheel. *Struct Multidisc Optim*. 2021. 64. pp. 2725–2747. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02953-9>
- 14 Yuan W.-H., Wang H.-C., Zhang W., Dai B.-B., Liu K., Wang Y. Particle finite element method implementation for large deformation analysis using Abaqus. *Acta Geotechnica*. 2021. 16(8). pp. 2449–2462. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11440-020-01124-2>
- 15 Babash A.V., Kvashnin V.O., Tarasov A.F., Gribov E.P. Implementation of the intensive plastic deformation process using a modern complete electric drive. *Modern problems and achievements in the field of radio engineering, telecommunications and information technologies* : materials of the IX International Scientific and Practical Conference. October 3–5, 2018. Zaporizhzhia: ZNTU. 2018. pp. 168-170 (in Ukrainian).
- 16 Kazachkovskii N.N., Yakupov D.V. Altivar 31 frequency converter programming: Methodical materials for advanced training courses and students of specialty 7.092203 "Electromechanical systems of automation and electric drive". Dnipropetrovsk: educational center of the company "Schneider Electric". 2006. 45 p. (in Russian).

Tarasov O. F., Kasyanyuk O. S., Gribov E. P., Babash A. V., Kovalenko A. K. Design of the experimental plant control system for the process of torsion under high pressure of hollow blanks

The development of industrial enterprises and the introduction of Internet of Things technology in production require the creation of new mechanisms, the development of which requires the use of modern components followed by precise computer control of the process. In the field of pressure metal processing, high pressure torsion (HPT) machines can be considered such mechanisms, since this process is gaining popularity due to obtaining a submicroscopic structure in the workpiece and extremely high strength of the material as a result of processing. At the same time, the use of HPT installations has significant limitations, which are determined by a significant number of parameters that can change non-linearly during the deformation process. Installation management problems are solved thanks to the use of automated control systems (ACS) for technological process parameters. The article presents the essence of a new process of hollow blanks deformation using torsion under high pressure. A description of the experimental setup and the controls used is given. This technological process is represented by a set of events and activities, the connection between which is displayed in the form of a cyclogram. On the basis of the analysis of the presented technological process, a system of monitoring and ACS of the installation was developed. A logic diagram of the ACS, a diagram of determining the composition of the ACS installation for the implementation of the HPT technology and a components diagram of its software complex have been developed. A schematic solution for using a frequency converter to set the torsion mechanism in motion is presented. An incremental encoder from Siemens and an STM32F4Discovery debugging board were used to accurately count the rotations number of the torsion mechanism. The use of a frequency electric drive made it possible to increase the efficiency of the installation control. The development and use of similar ACS for other pressure metal processing installations will guarantee a stable technological process and the necessary physical properties of the workpieces.

Keywords: high pressure torsion, hollow billet, plant, monitoring, automated control system

Тарасов А. Ф., Касьянюк А. С., Грибков Э. П., Бабаиш А. В., Коваленко А. К. Проектирование системы управления экспериментальной установкой для процесса кручения под высоким давлением полых заготовок

Развитие промышленных предприятий и внедрение технологии интернета в производстве требуют создания новых механизмов, для разработки которых необходимо использование современных компонентов с последующим точным компьютерным управлением процессом. В области обработки металлов давлением такими механизмами можно считать установки для кручения под высоким давлением (КВД, high pressure torsion, НРТ), поскольку этот процесс получает распространение благодаря получению субмикроскопической структуры в заготовке и чрезвычайно высокой прочности материала в результате обработки. В то же время использование установок КВД имеет существенные ограничения, которые обуславливаются значительным количеством параметров, которые могут нелинейно изменяться во время процесса деформации. Проблемы управления установкой решаются благодаря использованию автоматизированной системы управления (АСУ) параметрами технологического процесса. В статье приведена сущность нового процесса деформации полых заготовок посредством кручения под высоким давлением. Представлено описание экспериментальной установки и использованных элементов управления. Этот технологический процесс представлен множеством событий и деятельности, связь между которыми отражена в виде циклограммы. На основе анализа представленного технологического процесса разработана система мониторинга и установка АСУ. Разработана логическая схема АСУ, диаграмма определения состава установки из АСУ для реализации технологии КВД и диаграмма компонентов ее программного комплекса. Представлено схемное решение использования частотного преобразователя для приведения в движение механизма вращения. Для точного подсчета числа оборотов механизма вращения использован инкрементальный энкодер фирмы Siemens и отладочная плата STM32F4Discovery. Использование частотного электропривода позволило повысить эффективность управления установкой. Разработка и использование подобных АСУ для других установок для обработки металлов давлением позволит обеспечить стабильный технологический процесс и необходимые физические свойства заготовок.

Ключевые слова: кручение под высоким давлением, полая заготовка, установка, мониторинг, автоматизированная система управления

Тарасов Олександр Федорович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрою ДДМА
Tarasov Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department DSEA
Тарасов Александр Федорович – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ДГМА
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0493-1529>

Касьянюк Олександр Сергійович – асистент ДДМА
Kasyanyuk Oleksandr – Assistant DSEA
Касьянюк Александр Сергеевич – ассистент ДГМА
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8215-0920>

Грибков Едуард Петрович – д-р техн. наук, проф. ДДМА
Gribkov Eduard – Doctor of Technical Sciences, Full Professor DSEA
Грибков Эдуард Петрович – д-р техн. наук, проф. ДГМА
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1565-6294>

Бабаиш Андрій Владиславович – асистент ДДМА
Babash Andriy – Assistant DSEA
Бабаиш Андрей Владиславович – ассистент ДГМА
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7883-1459>

Коваленко Андрій Костянтинович – асистент ДДМА
Kovalenko Andrii – Assistant DSEA
Коваленко Андрей Константинович – ассистент ДГМА
E-mail: kit@dgma.donetsk.ua
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3379-2000>

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ
DSEA – Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk
ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск

Статья поступила в редакцию 30.05.22 г.