

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 539.3

Лавінський Д.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Морачковський О.К.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

АНАЛІЗ ДЕФОРМУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ ПОРОШКІВ У РАЗІ ДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

У роботі поставлено задачу проаналізувати деформування складених конструкцій, які використовуються для пресування порошкових матеріалів. Розглянуто можливість сумісного використання традиційного псевдоізостатичного пресування та електромагнітного пресування. Чисельним методом розв'язання використовується метод скінчених елементів. Наведено результати розрахунків, що ілюструють розподіл інтенсивності магнітного поля та інтенсивності напружень. Проведено серію розрахунків, у яких вивчено вплив зовнішнього електромагнітного поля на напружено-деформований стан елементів прес-форми.

Ключові слова: складені конструкції, пресування порошкових матеріалів, електромагнітне поле, напружено-деформований стан, метод скінчених елементів.

Постановка проблеми. Останніми роками все більша кількість технологічних операцій пов'язана із пресуванням порошкових матеріалів (ПМ). ПМ є сировиною для одержання як заготовок, так і готових виробів. Відомо, що конструкційні матеріали, які одержують з ПМ, практично не поступаються за механічними характеристиками матеріалам, які одержують традиційними способами (наприклад, литвом) [1]. Велика кількість технологічних процесів пресування (ущільнення) ПМ стосується обробки високоактивних відходів із метою їх подальшої утилізації. Один з напрямів передбачає пресування нових виробів з порошків тугоплавких сполук типу карбиду вольфраму, кобальту, нікелю. Ефективним процес пресування може бути тільки у разі підвищених температур. Так, за температури оброблюваного порошку $\sim 1800^\circ\text{C}$ і питомих тисках 30-40 МПа пресування може проводитися в матрицях з тугоплавких матеріалів. Для підвищення щільності готових виробів необхідно інтенсифікувати процес пресування шляхом збільшення тиску пресування. При цьому зростає навантаження на технологічне оснащення. Збільшення тиску пресування в цьому разі призводить до руйнування матриць з тугоплавких матеріалів, що вимагає використання матеріалів з підвищеними характеристиками міцності. За рівнів тиску 40-100 МПа можна використовувати для матриці вуглець-вуглецевий композиційний мате-

ріал – ВВКМ, який має високі механічні властивості у разі підвищених температур [2; 3].

У роботах [4; 5] наведено розрахункову схему прес-форми та надано постановку задачі аналізу напружено-деформованого стану (НДС) складеної прес-форми з ВВКМ, наведені результати розрахунків. Згідно з цими результатами можна стверджувати, що основні елементи прес-форм для обробки порошків високоміцних тугоплавких матеріалів (пуансон і матриця) є високонавантаженими конструкційними елементами, причому рівні напружень у них близькі до небезпечних, особливо це стосується матриці. Основним джерелом навантаження матриці є контактний тиск з боку вкладиша, який діє в радіальному напрямку. Підвищення довговічності матриці, очевидно, може бути досягнуто шляхом зниження цього радіального тиску. Також було виявлено, що вкладиш, який формує зовнішню поверхню виробу, набуває значних радіальних переміщень.

Основним джерелом навантаження вкладиша і матриці є радіальний тиск пресування, якщо в процесі пресування створити тиск, який діє на заготовку в протилежному напрямку (що забезпечує радіальне стиснення заготовки), то тоді знизиться навантаженість вкладиша і матриці. Створити такий стискаючий радіальний тиск можна, якщо використовувати енергію наведеного електромагнітного поля

(ЕМП), що розвивається зовнішнім індуктором. У цьому разі це можна реалізувати, якщо розмістити з боку зовнішньої поверхні матриці циліндричний спіральний багатовитковий індуктор. Застосування подібних індукторів широко поширене як у традиційних технологіях МІОМ, коли оброблювана заготовка розташована всередині індуктора (тут вплив класифікується за схемою «обтискання» [6]), так і у магнітно-імпульсному пресуванні порошкових матеріалів [1; 7; 8], коли електромагнітні сили діють безпосередньо на оброблюваний порошок.

Постановка завдання. Розглянемо розрахункову схему прес-форми із зовнішнім індуктором, яка може мати вигляд, наведений на рис. 1. У цьому разі електромагнітні сили, що розвиваються індуктором, будуть спрямовані до осі Oz вздовж радіуса. Зовнішній спіральний багатовитковий індуктор з ізоляцією на основі азбесту, струмопровід – з міді. Товщина ізоляції індуктора – $H=8$ мм, переріз струмопроводу – прямокутник 3 на 4 мм. Кількість витків струмопроводу варіюється. Прес-форма має такі розміри: $d_1=340$ мм, $d_3=340$ мм, $L=340$ мм. Вироби можуть мати різну висоту (l), яка задається відносно висоти прес-форми (L). Навантаженість вкладиша і матриці залежить від співвідношення їх товстотинностей, які можна визначити відношенням зовнішнього діаметра вкладиша (d_2) до зовнішнього діаметра матриці (d_3) у фіксованому діаметрі пресованого

виробу (d_1). Результати розрахунків за ізостатичного пресування [4; 5] свідчать, що найбільш навантаженими елементами прес-форми є у разі: $l/L = 0,550$ та $d_2/d_3=0,850$, тому подальші розрахунки проводились саме за цих співвідношень.

У таблицях 1 і 2 наведені фізико-механічні характеристики матеріалів ізоляції та струмопроводу індуктора, а також електрофізичні характеристики матеріалу елементів прес-форми та індуктора, які використовувалися в розрахунках.

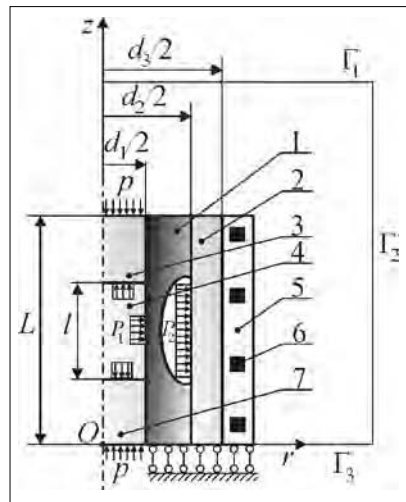


Рис. 1. Розрахункова схема пристрою з індуктором для пресування порожнистих виробів з порошків: 1 – вкладиш; 2 – матриця; 3, 7 – пуансони; 4 – брикет з порошку; 5 – ізоляція індуктора; 6 – струмопровід індуктора

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики матеріалу елементів прес-форми

	Пуансони (ВВКМ)	Матриця (ВВКМ)	Вкладиш (графіт АРВ-1)	Ізоляція (азбест)	Струмопровід (мідь)
E , ГПа	18	18	10,5	200	180
ν	0,19	0,19	0,2	0,2	0,33
σ_T , МПа	–	–	–	–	200
σ_B , МПа	–	–	–	700	–
$(\sigma_c)_B$, МПа	100	100	15	–	–
$(\sigma_c)_B$, МПа	110	110	51,5	–	–
α_T , $1/^\circ\text{C}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
ρ , кг/м^3	1500	1500	1600	2400	1500
λ , $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	130	130	120	0,05	130
c , $\text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$	1700	1700	1700	1050	1700

Таблиця 2

Електрофізичні характеристики матеріалу елементів прес-форми і індуктора

	Матриця, пуансони (ВВКМ)	Вкладиш, центральний стрижень (графіт АРВ-1)	Заготовка (карбід вольфраму)	Ізоляція (азбест)	Струмопровід (мідь)
γ , $1/(\text{Ом}\cdot\text{см})$	$0,372 \cdot 10^7$	$0,372 \cdot 10^7$	$0,522 \cdot 10^7$	0	$7 \cdot 10^7$
μ_r	1	1	1	1	1

Поведінка матеріалів складових частин прес-форми та ізоляції індуктора приймається в рамках пружної моделі, матеріал струмопроводу розглядаємо в рамках пружно-пластичної моделі.

На першому етапі вирішувалося завдання аналізу розподілу векторних компонент ЕМП. Тут прес-форма розглядалася спільно з навколишнім середовищем, на межах Г1, Г2 і Г3 задавалися нульові значення окружної компоненти векторного магнітного потенціалу, що моделює загасання ЕМП на віддаленні від джерела поля. Як джерело поля приймався струм, рівномірно розподілений по перетину витка струмопроводу, в часі густина струму приймалася за законом: $j(t) = I_m e^{-\delta 2\pi ft} \cdot \sin(2\pi ft)$, де амплітуда сили струму – $I_m = 30$ кА, частота – $f = 2$ кГц, відносний коефіцієнт загасання – $\delta = 0,3$.

Повна постановка задачі пружно-пластичного деформування контактної взаємодіючих систем тіл у разі дії ЕМП та метод розв'язання, що спирається на метод скінчених елементів (МСЕ), наведені у роботах [9–11], у роботах [10;11] наведено варіаційну постановку задачі, а також підхід до визначення електромагнітних сил, який базується на принципі віртуальної роботи. Моделювання контактної взаємодії проводилось відповідно до рекомендацій, представлених у [12].

Задача розв'язувалась у два етапи: спочатку визначалися просторово-часові розподіли основних компонент ЕМП, які потім використовувалися для визначення вузлових значень електромагнітних сил; далі проводилося визначення тензорно-векторних компонент НДС у квазістаціонарному наближенні, тому що в цьому разі впливом нестационарності ЕМП можна знехтувати. Це твердження ґрунтується на особливостях геометрії конструктивних елементів прес-форми, заготовки та індуктора – всі вони є досить масивними, а отже, мало схильними до можливості виникнення коливальних процесів.

Аналіз одержаних результатів. На рис. 2 наведені графіки розподілу дотичного складника напруженості магнітного поля уздовж внутрішньої поверхні вкладиша залежно від кількості витків струмопроводу в індукторі. Як відомо, узагальнений магнітний тиск пропорційний квадрату дотичного складника напруженості магнітного поля, а отже, розглядаючи просторову зміну цієї величини, можна зробити якісний прогноз про силову дію ЕМП на заготовку. З аналізу графіків можна зробити висновок, що найбільші значення напруженості спостерігаються в околі середини висоти вкладиша прес-форми, отже, саме тут будуть

виникати максимальні електромагнітні сили, спрямовані на стиск заготовки і, як наслідок, ці сили будуть знижувати радіальний тиск на елементи прес-форми. Таким чином, подібне розташування індуктора є в цьому разі обґрунтованим.

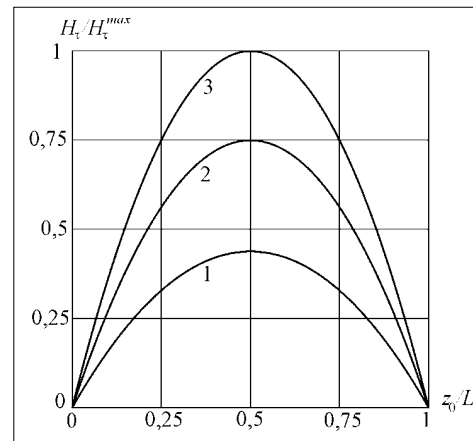


Рис. 2. Розподіл дотичного складника напруженості магнітного поля уздовж внутрішньої поверхні вкладиша за різної кількості витків струмопроводу індуктора: 1 – три витки, 2 – 6 витків, 3 – 9 витків

Збільшення кількості витків струмопроводу призводить (за незмінних розмірів перетину витка і незмінної амплітуди сили струму) до збільшення напруженості. Так, збільшення кількості витків з трьох до дев'яти призводить до збільшення напруженості приблизно на 110%, що, в свою чергу, призведе до збільшення рівнів електромагнітних сил. Отже, можна підвищувати ефективність електромагнітного впливу в цьому разі шляхом збільшення кількості витків, не збільшуючи амплітудні значення сили струму.

Перш ніж перейти до аналізу НДС елементів прес-форми, розглянемо питання, які стосуються температурного впливу в цьому разі. Перш за все необхідно враховувати, що прес-форма розглядається нагрітою до температури 1800°C, індуктор стикається із зовнішньою поверхнею матриці і можлива (в загальному випадку) теплопередача, яка може викликати нагрівання струмопроводу, а отже, знизити його електропровідність. Але в цьому разі ми розглядаємо ізоляцію індуктора на основі азбесту, а цей матеріал є також гарним термоізолятором (коефіцієнт теплопровідності 0,05 Вт/(м·К)), отже, очевидно, підвищена температура прес-форми не викличе значного нагрівання струмопроводу. Також відомо, що за протікання електричного струму в провіднику відбувається тепловиділення, але в цьому разі тепло, яке виділяється, внаслідок обставин, викладених вище, не впливатиме на температурне поле прес-форми, і в

подальшому аналізі НДС може не враховуватися. На рис. 3 показано часову залежність температури в центральній точці перетину струмопроводу індуктора. Видно, що за період часу, відповідний чотирьом імпульсам, відбувається нагрів на 120 градусів, чим у подальшому ми нехтуємо.

Потрібно відзначити, що температура струмопроводу монотонно зростає з плином часу, а високі термоізоляційні властивості азбесту перешкоджають відведенню тепла, відповідно, у разі безперервної роботи індуктора температура струмопроводу може досягти рівнів температури плавлення міді. Але цей факт зумовлений деякими особливостями такої вісесиметричної постановки завдання. Фактично розглядається дев'ять ізольованих один від одного замкнутих кілець і процес тепловідведення в такій постановці не може бути змодельований у принципі. У реальних конструкціях індукторів подібного типу й інших моделей, по-перше, відсутні ізольовані замкнуті кільця (найчастіше індуктор – це спіраль), а по-друге, є вивід струмопроводу, до якого можна підключати охолоджуючі елементи.

Перейдемо до аналізу деформування складників прес-форми сумісно із зовнішнім індуктором. На рис. 4 і 5 представлені розподіли інтенсивності напружень у прес-формі та індукторі. Найбільші напруження діють у центральних витках індуктора, причому за даної амплітуди сили струму (30 кА) вони становлять ~115 МПа, тобто відбувається пружне деформування, максимальні величини інтенсивності напружень в ізоляції індуктора незначні (порівняно з межею міцності азбесту), вони не перевищують 65 МПа. Рівні інтенсивності напружень у матриці знижуються приблизно на 27% порівняно з ізостатичним пресуванням [4; 5], причому найбільше зниження відбувається в центральній частині матриці, де, як було встановлено раніше, діють найбільші за величиною електромагнітні сили. Відзначимо, що найбільш навантаженими елементами прес-форми в цьому разі стають пуансони, але максимальна інтенсивність напружень (~ 70 МПа) тут не перевищує межу міцності для ВВКМ на розтягнення, і пуансони залишаються працездатними.

Як відомо, зі збільшенням амплітуди сили струму відбувається збільшення значень електромагнітних сил, що в технологічних системах, подібних розглянутій, призведе до зниження рівнів напружень в елементах прес-форм. Для складання кількісних оцінок була проведена серія розрахунків, в яких варіювалося значення амплітуди сили струму, що діє в індукторі. Виявилось, що за під-

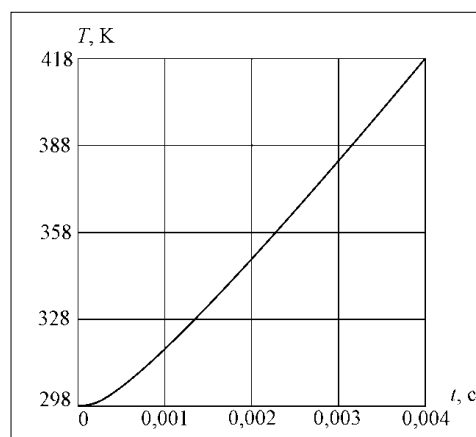


Рис. 3. Часова залежність температури в центрі перетину витка струмопроводу

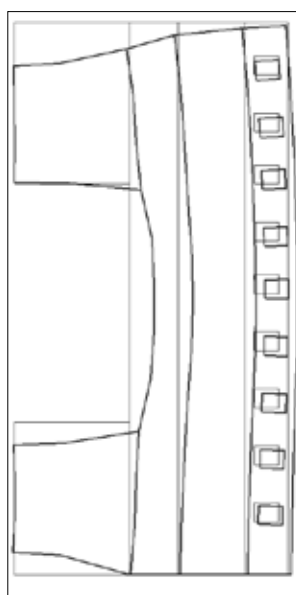


Рис. 4. Змінений стан прес-форми

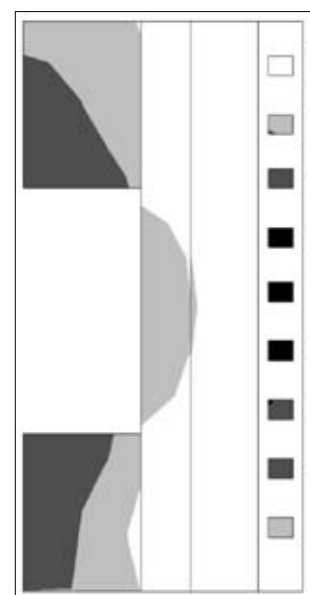


Рис. 5. Якісний розподіл інтенсивності напружень у прес-формі

вищення амплітуди відбувається значне зниження максимальних значень інтенсивності напружень у матриці. Так, у разі збільшення сили струму з 30 до 40 кА максимальна інтенсивність напружень у матриці знижується приблизно на 10%, така ж тенденція зберігається і у подальшому збільшенні сили струму.

Однак збільшення сили струму призводить також до збільшення електромагнітних сил, що діють на струмопровід індуктора: за збільшення амплітуди сили струму з 30 до 40 кА максимальна інтенсивність напружень зростає приблизно на 30%. У перевищенні силою струму величини 50 кА інтенсивність напружень перевищує межу текучості міді і в матеріалі струмопроводу з'являються зони пластичних деформацій. Тому

для індуктора з розглянутими геометричними розмірами струмопроводу використання сили струму більше 50 кА небажано.

Висновки. У роботі запропоновано використання сумісного ізостатичного та електромагнітного пресування порошків тугоплавких сполук у матрицях, виконаних з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів. Із використанням методу скінчених елементів визначені просторово-часові розподіли основних компонентів електромагнітного поля. Вплив електромагнітного поля на процес деформування враховано шляхом введення розподілених електромагнітних сил.

У квазістационарному наближенні проведено аналіз деформування основних елементів прес-форми.

Загалом, для розглянутої технологічної операції слід відзначити позитивний ефект у результаті застосування способу електромагнітної обробки матеріалів спільно із ізостатичним пресуванням. Спостерігається зниження навантаженості основного елемента прес-форми – матриці. Для визначення раціональних експлуатаційних параметрів проведено серію розрахунків, у яких вивчалась залежність інтенсивності напружень від величини амплітуди сили струму.

Список літератури:

1. Mamalis A. G., Manolacos D.E., Kladas A.G., Koumoutsos A.K. Electro-magnetic tooling for metal forming and powder compaction: numerical simulation. High Speed Forming: Proceedings of the 1st International Conference. 2004. P. 143–154.
2. Бушуев Ю.Г., Персин М.И., Соколов В.А. Углерод-углеродные композиционные материалы. М.: Металлургия, 1994. 128 с.
3. Нагорный В.Г., Котосонов А.С., Островский В.С. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник. М.: Металлургия, 1975. 335 с.
4. Бирюков О.В., Колосенко В.В., Саенко С.Ю., Лавинский Д.В., Морачковский О.К., Соболев В.Н. Статистический анализ прочности конструктивных элементов пресс-форм для прессования изделий из порошков. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». 2006. № 32. С. 28–32.
5. Ашихмин В.П., Бирюков О.В., Гурин В.А., Затолока Б.Б., Колосенко В.В., Саенко С.Ю., Лавинский Д.В., Морачковский О.К. Анализ прочности элементов пресс-форм из углерод-углеродных материалов для псевдоизостатического прессования. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2007. № 6 (91). С. 120–123.
6. Белый И.В., Фертик С.М., Хищенко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. Харьков: Вища школа, 1977. 189 с.
7. Миронов В.А. Прогрессивные способы производства деталей машин и приборов из порошковых материалов. Рига: Зинатне, 1974. 87 с.
8. Миронов В.А. Магнитно-импульсное прессование порошков. Рига: Зинатне, 1980. 196 с.
9. Лавинський Д.В., Морачковський О.К. Пружно-пластичне деформування систем тіл при дії електромагнітних полів. Вісник Запорізького національного університету: Фізико-математичні науки. 2015. № 2. С. 125–135.
10. Altenbach H., Morachkovsky O., Lavinsky D., Naumenko K. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. Continuum Mechanics and Thermodynamics. 2016. Vol. 28. No. 5. P. 1421–1433.
11. Lavinskii D.V., Morachkovskii O.K. Elastoplastic Deformation of Bodies Interacting Through Contact Under the Action of Pulsed Electromagnetic Field. Strength of materials. 2016. –Vol. 48. No. 6. P. 760–767.
12. Lavinskii D.V., Bondar’ S.V. Study of thermoelastoplastic contact deformation of production tooling mixed structures. Strength of materials. 2011. Vol. 43. No. 4. P. 447–454.

АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ПРЕССОВАНИЯ ПОРОШКОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

В работе поставлена задача проанализировать деформирование составных конструкций, использующихся для прессования порошковых материалов. Рассмотрена возможность совместного использования традиционного псевдоизостатического прессования и электромагнитного прессования. В качестве цифрового метода решения используется метод конечных элементов. Приведены результаты расчетов, иллюстрирующие распределение напряженности магнитного поля и интенсивности напряжений. Проведена серия расчетов, в которых изучено влияние внешнего электромагнитного поля на напряженно-деформированное состояние элементов пресс-формы.

Ключевые слова: составные конструкции, прессование порошковых материалов, электромагнитное поле, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов.

**THE DEFORMATION ANALYSIS OF STRUCTURES
FOR POWDER COMPACTION UNDER ELECTROMAGNETIC FIELD ACTION**

The problem statement of the compound structures deformation for powder compaction is given in this article. The capability of the joint use of traditional pseudoisostatic compaction and electromagnetic compaction is considered. The finite element method is used as numerical method of solution. It is given the numerical results, which show the magnetic field intensity and equivalent stress distribution. The influence of external electromagnetic field on stress-strain state of press-molding elements is studied under the number of numerical investigations.

Key words: *compound structures, powder compaction, electromagnetic field, stress-strain state, finite element method.*