

УДК 539.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/02>**Лавінський Д. В.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Аніщенко Г. О.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**Конохов В. І.**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ТЕРМОПРУЖНІСТЬ СКЛАДЕНИХ ПРЕС-ФОРМ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ НАГРІТИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В роботі розглядається аналіз термопружного деформування складених циліндричних матриць з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів, призначених для ізостатичного пресування нагрітих порошків надміцних матеріалів. У теперішній час велику популярність набули технологічні процеси виготовлення деталей та елементів конструкцій із порошкових матеріалів. Одним з напрямів є ізостатичне пресування нагрітих порошків надміцних матеріалів у складених матрицях з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів. Інтенсифікація виробничих технологічних процесів призводить до підвищення механічних та температурних навантажень на обладнання. Розрахункове дослідження деформування обладнання разом із заготовкою дозволяє зробити рекомендації стосовно раціональних значень конструкційних та експлуатаційних параметрів, за яких, по-перше, обладнання залишається працездатним, а, по-друге, досягається мета технологічної операції. У статті розглянуто розрахункові дослідження термопружного деформування системи «складена матриця – заготовка» за умов ізостатичного пресування нагрітих порошків надміцних матеріалів. Розрахунковий аналіз базується на послідовному розв'язанні двох задач: задачі нестационарної теплопровідності та задачі термопружного деформування з урахуванням особливостей контактної взаємодії поміж складових елементів конструкції. Розв'язано задачу нестационарної теплопровідності та зв'язану із нею задачу термопружності, на базі чого визначені небезпечні режими нагріву з точки зору навантаженості матриці. В якості чисельного метода розв'язання використовується метод скінчених елементів. Базовим обрано вісесиметричний чотирьох вузловий ізопараметричний скінченний елемент із білінійною апроксимацією температури та переміщень. Контактна взаємодія моделюється шляхом введення шарів спеціальних контактних скінчених елементів. Наведено результати розрахунків, що ілюструють розподіл температури та основних характеристик напружено-деформованого стану у різні моменти часу упродовж технологічного циклу пресування.

Ключові слова: термопружність, нестационарна теплопровідність, пресування порошкових матеріалів, контактна взаємодія, метод скінчених елементів.

Постановка проблеми. У даний час розвиток обробних технологій у машинобудуванні йде шляхом втілення нових інноваційних процесів, до яких слід віднести й пресування (компактування) порошкових матеріалів. Використання порошкових матеріалів дозволяє з меншими технологічними затратами одержувати вироби необхідної форми, також в даному випадку є можливість на етапі створення коригувати фізико-механічні властивості готових виробів. Широке застосування знаходить використання технологій пресування порошків у разі необхідності обробки надміцних

тугоплавких матеріалів типу карбіду вольфраму, кобальту, нікелю. Доволі часто супровідним чинником процесів пресування порошків є підвищена температура заготовки. В рамках подібних технологічних процесів інтенсивному навантаженню піддається обладнання прес-форми. Можуть виникнути такі умови, що призведуть до втрати працездатності та руйнування прес-форми.

Розрахункові дослідження процесу деформування технологічної системи «прес-форма – заготовка» дозволяють з невеликими матеріальними затратами визначати раціональні експлуатаційні

та конструкційні параметри, за яких елементи прес-форми залишаються працездатними та, при цьому, досягається мета технологічної операції, тобто отримується готовий виріб із необхідними фізико-механічними властивостями. Зрозуміло, що адекватний розрахунковий аналіз повинен містити усі необхідні супутні аспекти, наприклад, дослідження стосовно розподілу температурного поля та подальший аналіз термодиформування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід відзначити, що на даний момент є достатньо інформаційних джерел, у яких докладно висвітлені принципи та сучасні тенденції розвитку технологічних операцій пресування порошкових матеріалів. Наприклад, можна відзначити роботи [1–5]. Існують різні способи передачі навантаження на заготовку. Найбільш поширеним є схеми осьового та радіального пресування. Разом із цим для підвищення щільності виробів, які одержуються, може застосовуватись технологія ізостатичного пресування у холодному та гарячому варіантах [6, 7]. У другому варіанті заготовка попередньо піддається нагріву. Температура заготовки при цьому може спричиняти значний нагрів елементів прес-форми, що, в свою чергу, призводить до додаткового механічного навантаження.

Складні умови експлуатації прес-форм вимагають використання матеріалів з підвищеними характеристиками міцності. При рівнях тиску 40–100 МПа та температурах заготовки до 1800 °С можна використовувати для елементів прес-форми вуглець-вуглецевий композитний матеріал (ВВКМ), який має високі механічні властивості при підвищених температурах [8, 9].

Взагалі, ВВКМ у даний час все більше використовуються у різних галузях машинобудування та обробки матеріалів. Завдяки своїй високій міцності, стійкості до високих температур і низькому коефіцієнту теплового розширення ВВКМ використовуються в різних сферах. Вони використовуються у аерокосмічній галузі, у медицині (протезування), а також для ізоляції печей і обладнання для високотемпературної обробки.

Незважаючи на достатню кількість інформаційних джерел стосовно технологічних процесів пресування порошкових матеріалів, деякі питання залишаються недостатньо опрацьованими. Це може відноситись, у тому числі й до питань розрахунків на міцність елементів прес-форм з урахуванням усіх можливих чинників навантаження. Таким чином, тема роботи є актуальною у науковому і практичному сенсі.

Постановка завдання. На рис. 1 наведено модель складеної прес-форми, яка призначена для ізостатичного пресування нагрітих порошків високоактивних надміцних сполук. Прес-форма містить наступні елементи: зовнішню матрицю та пуансони (з ВВКМ) та графітовий вкладиш. Вкладиш разом із готовим виробом виймається з заготовки, матриця та пуансони повинні витримувати декілька циклів пресування. Загальна висота прес-форми складає 540 мм, зовнішній діаметр – 340 мм, висота виробу (заготовки) обрана як 0,55 висоти прес-форми. Діаметр заготовки дорівнює 120 мм, співвідношення між зовнішнім діаметром графітового вкладиша та зовнішнім діаметром дорівнює 0,850.

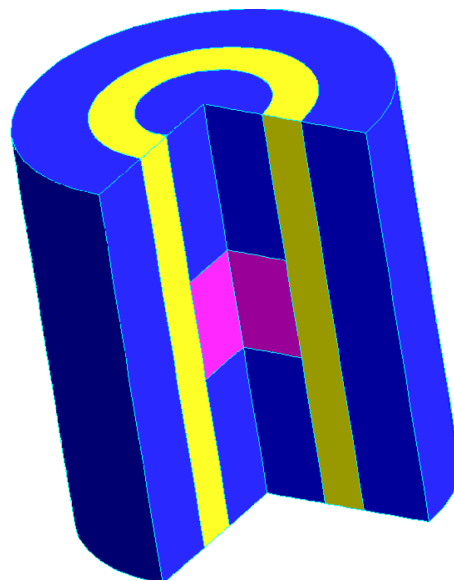


Рис. 1. Геометрична модель складеної прес-форми: сині – матриця та пуансони з ВВКМ; жовтий – вкладиш з графіту; бузковий – компактована заготовка

У таблиці 1 приведені фізико-механічні характеристики матеріалів елементів прес-форми, які використовувалися у подальших розрахунках.

Таблиця 1
Фізико-механічні характеристики матеріалу елементів прес-форми

	Пуансони (ВВКМ)	Матриця (ВВКМ)	Вкладиш (графіт АРВ-1)
E , ГПа	18	18	10,5
ν	0,19	0,19	0,2
$(\sigma_+)_{\text{В}}$, МПа	100	100	15
$(\sigma_-)_{\text{В}}$, МПа	110	110	51,5
α_T , $1/^\circ\text{C}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$
ρ , кг/м^3	1500	1500	1600
λ , $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	130	130	120
c , $\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$	1700	1700	1700

Ціллю роботи є оцінка впливу режимів температурного навантаження на деформування елементів прес-форми.

Виклад основного матеріалу. Поставлене завдання потребує розв'язання двох задач: задачі нестационарної теплопровідності та задачі термодформування. Дослідження поширення температури і подальшого термодформування тіл складної конфігурації в рамках єдиної постановки можливо тільки із застосуванням чисельних методів аналізу, найбільш ефективним з яких є метод скінченних елементів (МСЕ).

Умови навантаження, закріплення і розподілу температури в реальній прес-формі практично не залежать від окружної координати, що дозволяє розглядати задачу в вісесиметричній постановці. У даному випадку нестационарний розподіл температури у елементах прес-форми розглядався із граничними умовами конвекційного теплообміну. Розподіл основних характеристик процесу деформування розглядався у рамках термопружної постановки. Базовим скінченним елементом обрано ізопараметричний чотирьох вузловий елемент із білінійною апроксимацією температури та переміщень.

Окремі питання стосувались урахуванню контактної взаємодії – для цього на межах контакту вводились спеціальні контактні шари. Вони були дискретизовані за допомогою спеціальних контактних скінчених елементів, властивості яких задавалися відповідно до рекомендацій, наведених у роботі [10]. Відзначимо, що коефіцієнт тертя на межах розділу пуансон – вкладиш, і вкладиш – матриця задавався рівним 0,18; на межах розділу вкладиш – заготовка рівним 0,22.

Схематизований режим зміни температури заготовки в процесі пресування можна представити наступним чином: пресування заготовки відбувається протягом 100 с, коли температура заготовки постійна і становить 1800 °С. Далі протягом 25 с в реальності заготовка відсутня в прес-формі, проте елементи прес-форми практично не встигають охолоджуватись, далі – наступне пресування. Таким чином, можна розглядати задачу нестационарної теплопровідності за умови, що у часовому інтервалі від 0 до 1175 с (10 пресувань) у прес-формі знаходиться заготовка нагріта до 1800 °С. При розв'язанні задачі нестационарної теплопровідності варіювався крок за часом: $\Delta t = 0,5$ с; 0,25 с; 0,1 с; 0,05 с. Виявилося, що при зміні кроку від 0,1 до 0,05 с максимальна різниця в розподілі температури не перевищує 2 %.

На рис. 2 та 3 представлені розподіли температур, що встановилися в прес-формах на 100 с (наприкінці 1-го пресування) та сталий розподіл. Найбільш нагрітими елементами прес-форми є вкладиш, центральний стержень і пуансон.

Наприкінці 1-го пресування (100 с) більша частина зовнішньої матриці є практично не нагрітою.

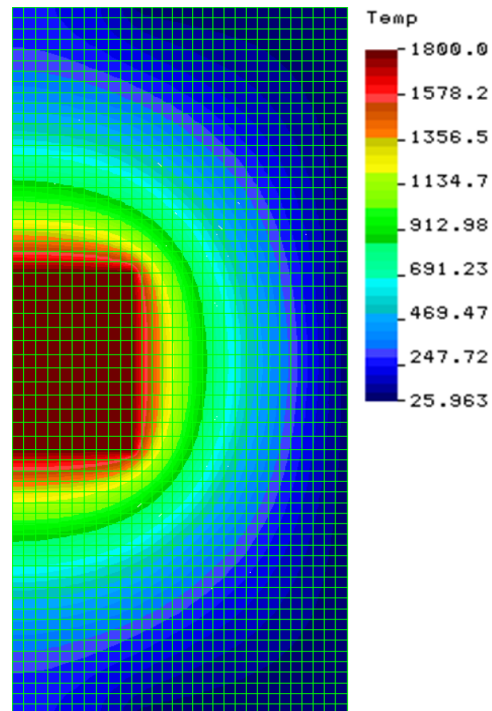


Рис. 2. Розподіл температури на 100 с

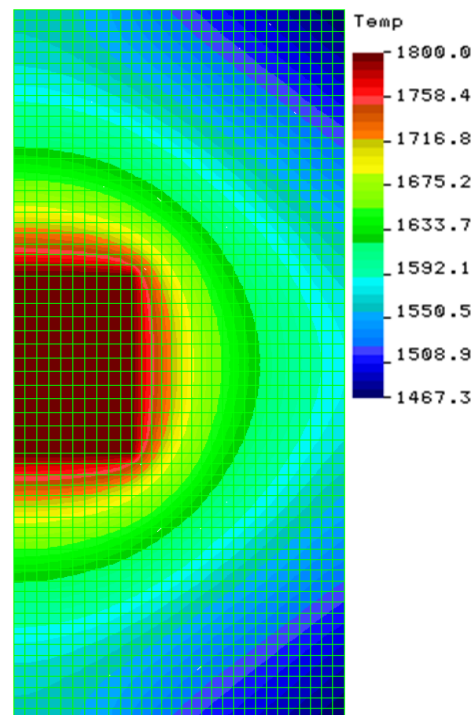


Рис. 3. Сталий розподіл температури

У даному випадку має місце значний перепад температури по товщині прес-форми: у точках, які належать середині висоти прес-форми температура змінюється від 1000 °С до температури зовнішнього середовища – 30 °С.

У випадку сталого розподілу температури перепад по товщині прес-форми є менш значним у порівнянні із моментом часу 100 с: максимальна температура встановлюється така ж, як і у нагрітій заготовці – 1800 °С, мінімальна на рівні приблизно 1550 °С. Найменш нагрітими є області прес-форми найбільш віддалені від заготовки, проте на сталому режимі і тут температура стає значною – порядку 1470 °С.

На рис. 4 представлені графіки залежності від часу температури в різних точках прес-форми. Наведені графіки показують, що сталий режим навіть в найвіддаленіших точках від джерела тепловиділення досягається приблизно за 300 с (крива 4), що відповідає вже третьому пресуванню, таким чином, при всіх наступних пресуваннях елементи прес-форми будуть знаходитися в сталому температурному режимі і розгляд даного режиму є обґрунтованим в даному випадку.

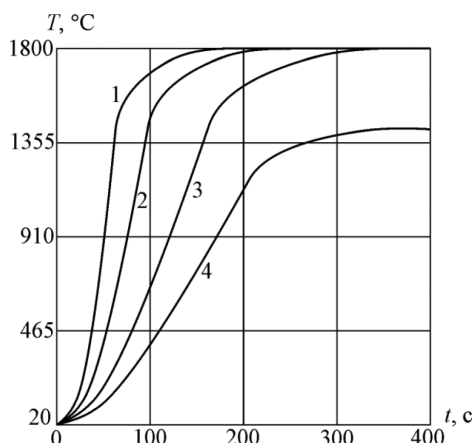


Рис. 4. Залежність від часу температури в різних точках прес-форми: 1 – внутрішня межа вкладиша; 2 – внутрішня межа матриці; 3 – зовнішня межа вкладишу; 4 – зовнішня межа матриці

Для точок, що належать внутрішній поверхні вкладиша і торцям пуансонів, які стикаються з нагрітою заготовкою, температура досягає 1800 °С вже при першому пресуванні в момент часу приблизно рівному 85 с. В цілому, слід зазначити, що швидше за все нагріваються ті області елементів прес-форми, які розташовуються в безпосередній близькості від нагрітої заготовки.

Температурне поле було визначено для різних розмірів пресованої заготовки і для різних співвідношень «товстостінності» вкладиша і матриці.

Відзначимо, що якісно розподіли температури в кожному випадку є ідентичними. При більшій товщині вкладиша температура матриці виявляється нижче, але при цьому різниця не перевищує 20 °С.

Перейдемо до аналізу НДС складеної прес-форми, яка піддається силовому і температурному впливу. Розглянемо два граничних режиму температурного впливу на елементи прес-форми: режим першого пресування, коли прес-форма не нагріта та сталий режим розподілу температури (заготовка вважається нагрітою рівномірно).

Очевидно, що в цих двох випадках елементи прес-форми будуть навантажені по-різному, найбільший інтерес представляє випадок максимального навантаження елементів прес-форми, особливо зовнішньої матриці і пуансонів, які повинні витримувати кілька циклів пресування. Для оцінки ступеня впливу режиму температури на навантаженість елементів прес-форми був проведений аналіз НДС системи, яка моделює прес-форму для виготовлення виробів з порошкових матеріалів. Разом із температурним навантаженням враховувався також й тиск пресування: 30 МПа.

Для визначення НДС компонентів прес-форми використовувались дані розв'язання задачі стаціонарної та нестационарної теплопровідності (для режиму першого пресування у момент часу 100 с). На рис. 5 та 6 наведені результати із розподілу інтенсивності напружень у елементах прес-форми при двох режимах температурного навантаження.

Відзначимо, що значних якісних відмінностей в розподілі компонент НДС при режимі першого пресування та при сталому розподілі температури не спостерігається: і матриця, і пуансони є навантаженими практично однаково. Проте у кількісному вимірі матриця є найбільш навантаженою саме при сталому режимі. Максимальна інтенсивність напружень у матриці при сталому розподілі температури складає 38 МПа проти 20 МПа у момент часу 100 с. Також у достатньо високому ступеню є навантаженими пуансони.

Висновки. В роботі розглянуті питання розрахункового аналізу розподілу нестационарного температурного поля та процесу термодформування складених прес-форм, які використовуються для виготовлення шляхом гарячого ізостатичного пресування виробів з порошків надміцних тугоплавких сполук. Розглянуто варіант виконання прес-форми, яка містить зовнішню матрицю

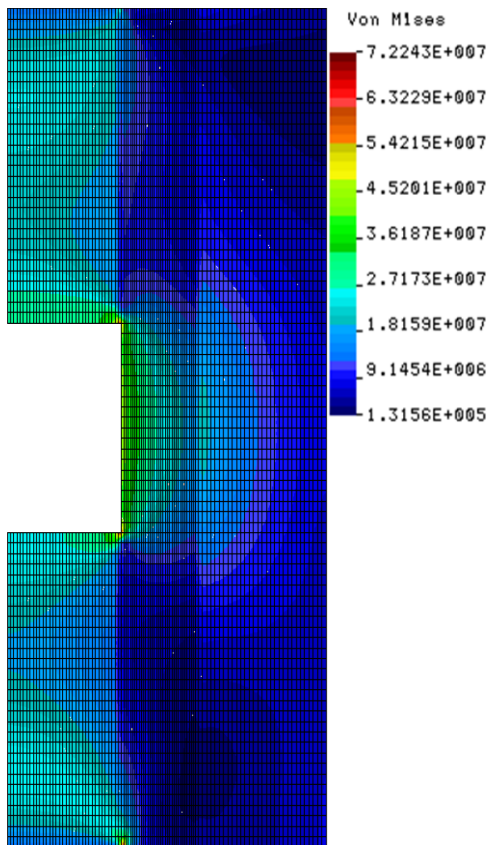


Рис. 5. Інтенсивність напружень у момент часу 100 с

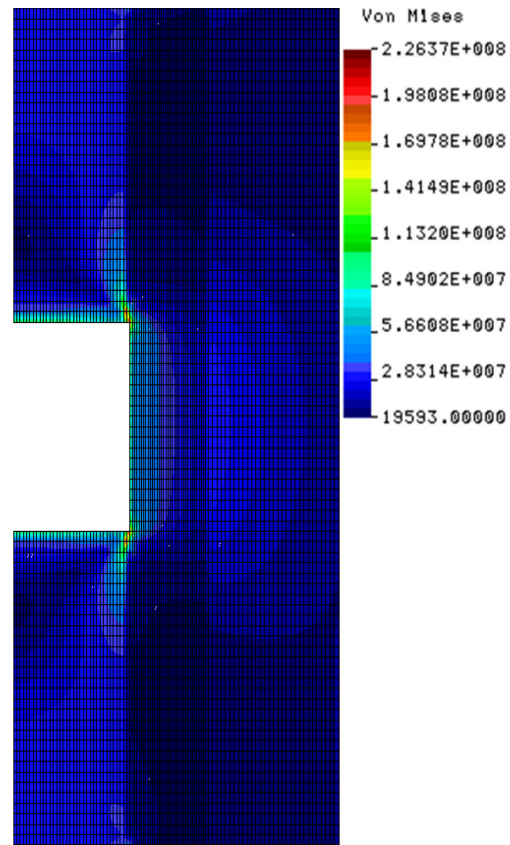


Рис. 6. Інтенсивність напружень за умов сталого розподілу температури

(ВВКМ), пуансони (ВВКМ) та вкладиш (графіт). Чисельні дослідження виконані із застосуванням методу скінченних елементів, поміж складових перс-форми враховані умови контактної взаємодії. Розв'язано задачу нестационарної теплопровідності та, на її основі – задачу термодформування. Визначено, що з умови сталого розподілу

температури елементи прес-форми стають найбільш навантаженими.

Подальші дослідження стосуються міцності елементів прес-форми із застосуванням відповідних критеріїв та врахування у розрахункових процедурах залежності фізико-механічних властивостей від температури.

Список літератури:

1. Mamalis A.G., Manolakos 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 1 st International Conference*. 2004. P. 143–154.
2. Thümmel F., Oberacker R. An introduction to powder metallurgy. CRC Press., 2024. 325 p.
3. Angelo P.C., Subramanian R., Ravisankar B. Powder metallurgy: science, technology and applications. PHI Learning Pvt. Ltd., 2022. 323 p.
4. Rodriguez-Contreras A., Punset M., Calero J.A., Gil F.J., Ruperez E., Manero J.M. Powder metallurgy with space holder for porous titanium implants: A review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. Vol. 76. P. 129–149.
5. Гогаєв К.О., Радченко О.К., Нгуєн К.К., Радченко Л.О. Одержання біметалів методами порошкової металургії (Огляд). *Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства*. Київ : ІПМ НАН України. 2011. Вип. 20. С. 101–107.
6. Шеремет В.І., Втерковський М.Я., Тесля С.Ю., Соловйова Т.О. Оптимізація процесу холодного ізостатичного пресування порошків магнію та його сплавів. *Наукові нотатки*. Луцьк : ЛНТУ. 2024. Том 1. Вип. 79–80. С. 65–69.
7. Atkinson H.V., Davies S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000. Vol. 31. No. 12. P. 2981–3000.
8. Devi G.R., Rao K.R. Carbon-Carbon Composites – An Overview. *Def. Sci. J.* 1993. Vol. 43. P. 369–383.

9. Anilas K., Surendranathan A.O. Carbon-Carbon composites – A review. *UPI Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 1. No. 1. P. 8–19.

10. 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.

Lavinsky D. V., Anischenko G. O., Konokhov V. I. THERMOELASTICITY OF COMPOSITE MOLDS FOR PRESSING HEATED POWDER MATERIALS

The paper considers the analysis of thermoelastic deformation of folded cylindrical molds made of carbon-carbon composite materials intended for isostatic pressing of heated powders of heavy-duty materials. At present, technological processes for the manufacture of parts and structural elements from powder materials have become very popular. One of the directions is isostatic pressing of heated powders of heavy-duty materials in folded molds of carbon-carbon composite materials. Intensification of production technological processes leads to an increase in mechanical and temperature loads on equipment. The computational study of the deformation of the equipment together with the workpiece allows us to make recommendations regarding the rational values of design and operational parameters, under which, firstly, the equipment remains operational, and, secondly, the goal of the technological operation is achieved. The paper considers the computational studies of thermoelastic deformation of the system “folded mold – workpiece” under the conditions of isostatic pressing of heated powders of heavy-duty materials. The computational analysis is based on the sequential solution of two problems: the problem of non-stationary transient heat transferring and the problem of thermoelastic deformation, taking into account the peculiarities of contact interaction between the constituent elements of the structure. The problem of non-stationary transient heat transferring and the related problem of thermoelasticity are solved, on the basis of which dangerous heating modes in terms of matrix load are determined. The method of finite elements is used as a numerical method of solution. An axisymmetric four-node isoparametric finite element with a bilinear approximation of temperature and displacements was chosen as the baseline. Contact interaction is simulated by introducing layers of special contact finite elements. The results of calculations illustrating the distribution of temperature and the main characteristics of the stress-strain state at different points of time during the technological cycle of pressing are presented.

Key words: thermoelasticity, non-stationary transient heat transferring, pressing of powder materials, contact interaction, finite element method.