

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 539.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.1/02>

Лавінський Д.В.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Аніщенко Г.О.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Конкін В.М.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Конохов В.І.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ МІЦНОСТІ СКЛАДЕНИХ ПРЕС-ФОРМ ДЛЯ ОБРОБКИ НАГРІТИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В роботі розглядається розрахунковий аналіз міцності складених прес-форм, для ізостатичного пресування нагрітих порошкових матеріалів. Ізостатичне пресування нагрітих порошків надміцних матеріалів у складених прес-формах виготовлених з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів є одним із сучасних напрямів обробних галузей машинобудування. Ключовим моментом інтенсифікації технологічних процесів є підвищення силового впливу на заготовку, що, в свою чергу, призводить до підвищення силового впливу на елементи прес-форми. Розрахунковий аналіз деформування прес-форми 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 прес-форма – заготовка» з метою оцінки міцності елементів обладнання. Було розглянуто випадок рівномірного нагріву заготовки та елементів прес-форми. Розрахункові дослідження проводились із застосуванням методу 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, які вводились поміж складовими частинами прес-форми та поміж прес-формою та заготовкою. Для оцінки міцності елементів прес-форми застосовано критерій Кулона-Мора. Еквівалентне напруження відповідно до цього критерію порівнювалось із граничними значеннями міцності. Наведено результати розрахунків, що ілюструють основних характеристик напружено-деформованого стану у елементах прес-форми. Виконано серію розрахунків, у яких варіювались розміри елементів прес-форми та їх вплив на показники міцності.

Ключові слова: розрахунковий аналіз, міцність, термодформування, ізостатичне пресування порошкових матеріалів, контактна взаємодія, метод скінчених елементів.

Постановка проблеми. У даний час розвиток обробних технологій у машинобудуванні характеризується шляхом застосування нових інноваційних процесів. До них можна віднести й пресування порошкових матеріалів. Використання

порошкових матеріалів дозволяє з меншими технологічними затратами одержувати вироби необхідної форми, також в на етапі створення коригувати фізико-механічні властивості готових виробів. Технологія пресування порошків широко

застосовується для обробки надміцних тугоплавких матеріалів типу карбіду вольфраму, кобальту, нікелю у тому числі й із застосуванням їх нагріву.

При подібних технологічних операціях інтенсивному навантаженню піддається обладнання прес-форми. Збільшення інтенсивності впливу на заготовку призводить до збільшення силового впливу на елементи прес-форми, що може викликати втрати працездатності за рахунок руйнування.

Розрахунковий аналіз міцності дозволяє визначати раціональні значення конструкційних та експлуатаційних параметрів, за яких прес-форма залишається працездатною, а мета технологічної операції – досягається.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний момент існує достатньо інформаційних джерел, у яких докладно висвітлені принципи та сучасні тенденції розвитку технологічних операцій пресування порошкових матеріалів. Наприклад, можна відзначити роботи [1–5]. Роботи [1–3] можна розглядати як такі, що дають вичерпну картину існуючих сучасних технологічних операцій порошкової металургії. Роботи [4, 5] розкривають тенденції розвитку технологій обробки порошків із застосуванням електромагнітного поля. Для підвищення щільності виробів, які одержуються, а також при обробці порошків високоміцних матеріалів застосовується 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 термомеханічного навантаження на них.

За складних умов експлуатації можна використовувати для виконання елементів прес-форми вуглець-вуглецевий композитний матеріал (ВВКМ), який має високі механічні властивості при підвищених температурах [8, 9].

Сучасний підхід до проектування складних технічних та технологічних систем потребує проведення попереднього розрахункового аналізу, який в тому числі має містити аналіз деформування з метою оцінки міцності. Стосовно технологій обробки порошкових матеріалів розрахунки деформування можуть дати відповідь на два питання: стосовно міцності елементів прес-форми та стосовно досягнення необхідних показників заготовки. Приклади проведення подібного розрахункового аналізу містяться

у роботах [10, 11], де в якості чисельного методу розрахунку використовується метод скінченних елементів (МСЕ).

Проведений аналіз відкритих інформаційних джерел дає змогу констатувати, що тема дослідження є актуальною у науковому і практичному сенсі.

Постановка завдання. На рис. 1 та 2 представлені розрахункові схеми складених прес-форм для виготовлення порожнистих і суцільних виробів з порошкових матеріалів.

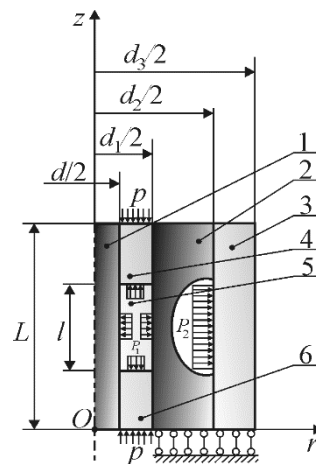


Рис. 1. Розрахункова схема прес-форми для виготовлення порожнистих виробів з порошків: 1 – центральний стержень; 2 – вкладиш; 3 – матриця; 4, 6 – пуансон; 5 – брикет з порошку

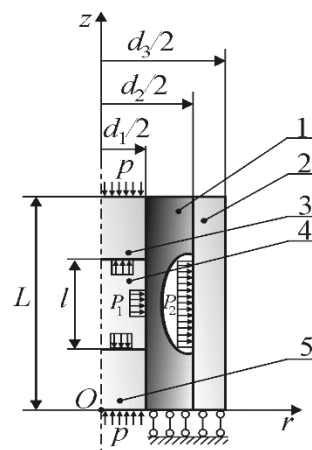


Рис. 2. Розрахункова схема прес-форми для виготовлення суцільних виробів з порошків: 1 – центральний стержень; 2 – вкладиш; 3 – матриця; 4, 6 – пуансони; 5 – брикет з порошку

Прес-форми мають такі розміри: $d_1 = 340$ мм, $d_3 = 340$ мм, $L = 380$ мм. Вироби можуть мати різну висоту (l), яка задається відносно висоти прес-форми (L). Розглядаються наступні

варіанти: $l/L = 0,250; 0,315; 0,395; 0,470; 0,550$. Навантаженість вкладиша і матриці залежить від співвідношення їх товстостінностей, які можна визначити відношенням зовнішнього діаметра вкладиша (d_2) до зовнішнього діаметра матриці (d_3) при фіксованому діаметрі пресованого виробу (d_1). Розглядаються наступні варіанти: $d_2/d_3 = 0,723; 0,787; 0,850$. При аналізі деформування прес-форм для виготовлення порожнистих виробів варіювався діаметр центрального стержня (d) в залежності від висоти прес-форми (L): $d/L = 0,15; 0,2; 0,25$.

Тиск, що задається p і який прикладається до верхнього і нижнього пуансонів, може бути отриманий в залежності від поздовжньої сили P . Нижній торець вкладиша і матриці закріплені – тут задаються нульові переміщення. Показані контактні тиски p_1 і p_2 визначаються в процесі розв'язання контактної задачі. При визначенні розподілу температури у елементах прес-форми джерелом температури розглядалась рівномірно нагріта заготовка.

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

Ціллю роботи є про ведення аналізу міцності прес-форм з метою визначення найбільш небезпечних співвідношень конструктивних параметрів з точки зору найбільшої навантаженості її елементів.

Виклад основного матеріалу. Розв'язання проводилось для випадку рівномірного нагріву усіх елементів прес-форми до температури 1800°C . У якості чисельного методу аналізу використовувався МСЕ.

Умови навантаження, закріплення і розподілу температури в реальній прес-формі практично не залежать від окружної координати, що дозволяє розглядати задачу в вісесиметричній постановці. Розподіл основних характеристик процесу деформування розглядався у рамках термопружної постановки. Базовим скінченням 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. Для дискретизації контактних шарів використані спеціальні контактні скінченні елементи, властивості яких задавалися відповідно до рекомендацій, наведених у роботі [12]. Відзначимо, що коефіцієнт тертя на межах розділу пуансон – вкладиш, і вкладиш – матриця задавався рівним $0,18$; на межах розділу вкладиш – заготовка рівним $0,22$.

Графіт і ВВКМ відносяться до крихких матеріалів, які мають різні значення межі міцності на розтяг та стиск, тому для оцінок працездатності елементів прес-форми будемо використовувати критерій Кулона-Мора, еквівалентне напруження, згідно із яким обчислюється так:

$$\sigma_{\text{Mo}} = \sigma_1 - \frac{\sigma_{\text{Br}}}{\sigma_{\text{Bc}}} \sigma_3$$

де σ_1 та σ_3 – перше та третє головне напруження, σ_{Br} та σ_{Bc} – значення границь на розтяг та стиск.

На рис. 3 та 4 наведені розподіли еквівалентних напружень σ_{Mo} у меридіональних перерізах складених прес-форм для виготовлення суцільних і порожнистих і виробів.

Наведені дані дозволяють сформулювати загальні закономірності деформування прес-форм, які справедливі при різних співвідношеннях геометричних розмірів елементів і також справедливі для обох типів прес-форм. Найбільш навантаженими є елементи прес-форм, які безпосередньо контактують із заготовкою, а також область матриці, що контактує із вкладишем. Найбільші значення еквівалентних напружень σ_{Mo} спостерігаються в околі верхнього торця матриці. При розглянутій величині зовнішнього тиску (30 МПа) максимальні значення σ_{Mo} у елементах прес-форми, що виконані з ВВКМ (пуансони

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики матеріалу елементів прес-форми

	Пуансони (ВВКМ)	Матриця (ВВКМ)	Вкладиш, центральний стержень (графіт АРВ-1)
E , ГПа	18	18	10,5
ν	0,19	0,19	0,2
$(\sigma^+)_{\text{B}}$, МПа	100	100	15
$(\sigma^-)_{\text{B}}$, МПа	110	110	51,5
α_{T} , $1/^\circ\text{C}$	$3,5 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-6}$	6×10^{-6}
ρ , кг/м ³	1500	1500	1600
λ , Вт/(м·К)	130	130	120
c , Дж/(кг·К)	1700	1700	1700

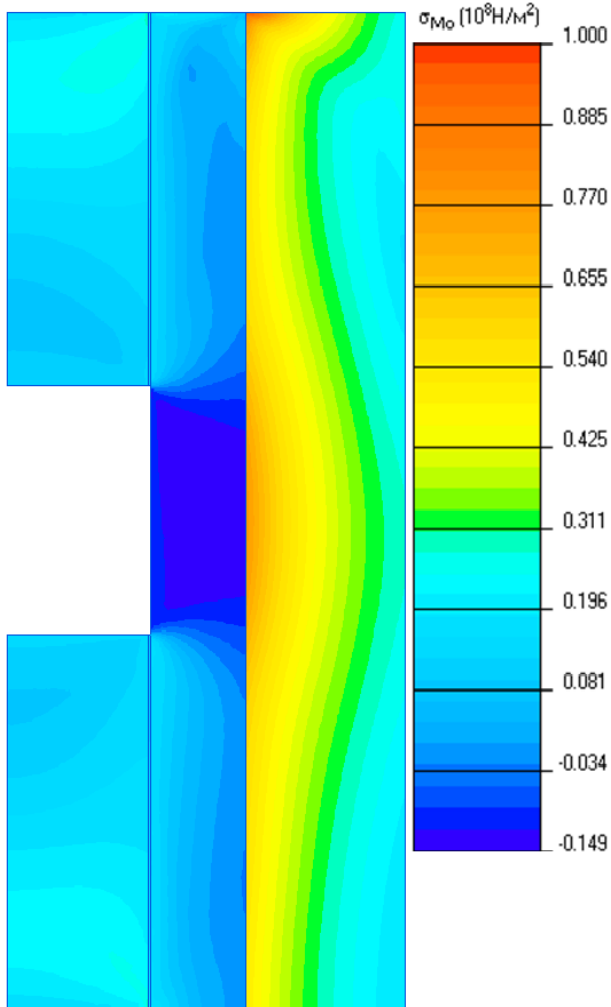


Рис. 3. Розподіл еквівалентних напружень за теорією Кулона-Мора (пресування суцільних виробів)

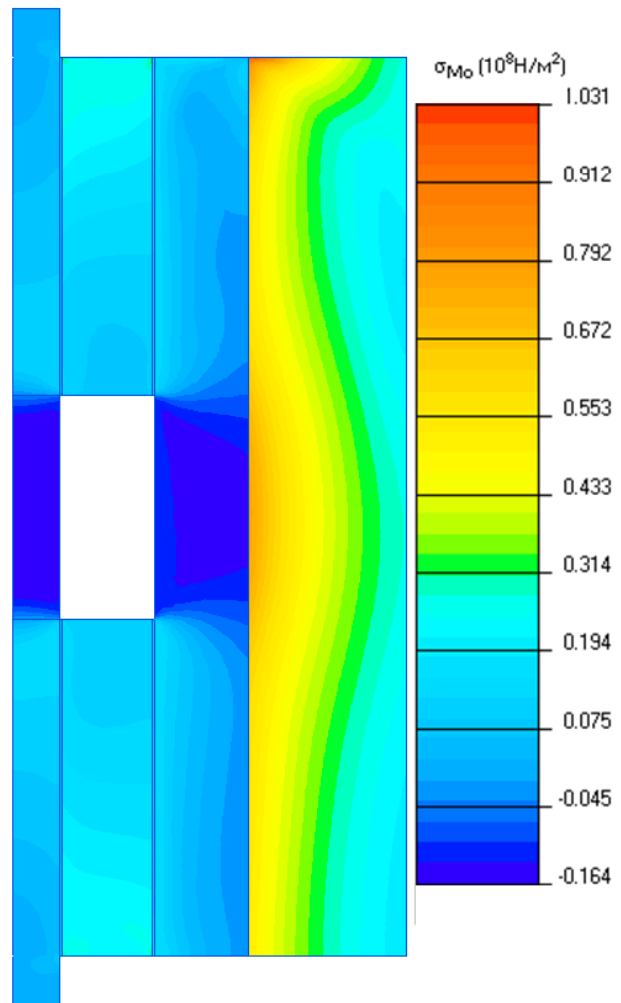


Рис. 4. Розподіл еквівалентних напружень за теорією Кулона-Мора (пресування порожнистих виробів)

та матриця), дорівнюють приблизно 77 МПа у центральній зоні та приблизно 100 МПа в околі верхнього торця матриці. Таким чином, за розглянутих умов навантаження та конструкційних параметрах максимальні еквівалентні напруження σ_{Mo} не перебільшують межі міцності на розтяг для ВВКМ, і можна стверджувати, що пуанسونи та зовнішня матриця залишаються працездатними.

Що стосується вкладишу та центрального стержня з графіту, то максимальні значення σ_{Mo} спостерігаються не в зоні максимальної навантаженості (біля заготовки), а на віддаленні до торців, причому величина σ_{Mo} є більшою за межу міцності на розтяг для графіту. У центральній зоні стержню та вкладишу величина σ_{Mo} є від'ємною. Поясненням цьому є особливість напруженого стану у цій зоні – усі головні напруження є від'ємними (рис. 5). Тобто, для даної зони відповідних елементів прес-форми критерій

Кулона-Мора не є об'єктивним. У даному випадку можна робити оцінювання за величиною найменшого головного напруження (σ_3) у порівнянні із межею міцності на стискання. Максимальне значення σ_3 за модулем складе приблизно 67 МПа, що більше ніж межа міцності на стиск графіту (51,5 МПа). Аналіз напруженого стану вкладишу та центрального стержня підтверджує положення, що ці конструктивні елементи не витримують більш ніж одне пресування.

Далі розглянемо більш докладно напружений стан матриці, як основного елемента, що забезпечує працездатність прес-форми. Встановимо, при виготовленні яких виробів (суцільних або порожнистих) матриця є найбільш навантаженою. На рис. 6 наведено графіки розподілу еквівалентних напружень σ_{Mo} уздовж внутрішньої поверхні матриці. Якісний розподіл в обох

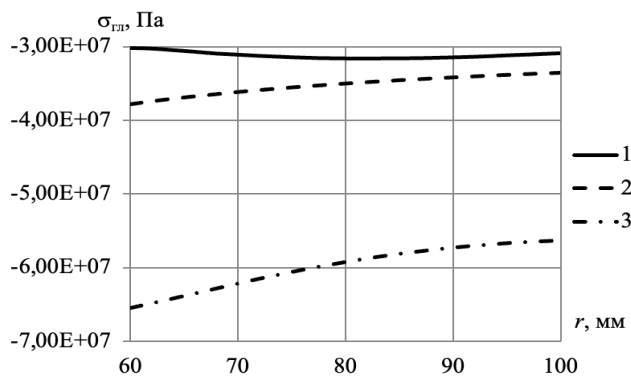


Рис. 5. Розподіл головних напружень за товщиною вкладиша ($z = L/2$): 1 – σ_1 , 2 – σ_2 , 3 – σ_3

випадках є ідентичним. Кількісно спостерігаються деякі відмінності, проте вони не перевищують 3%. Можна стверджувати, що при виготовленні виробів обох типів однакової висоти зовнішня матриця є навантаженою практично однаково. Результати аналізу напруженого стану зовнішньої матриці, одержані при для одного з типів виробів можуть бути поширені і на інший тип.

Наступна серія розрахунків була проведена з метою з'ясування впливу висоти виробу на напружений стан матриці. На рис. 7 представлені графіки, які ілюструють розподіл еквівалентного напруження σ_{Mo} вздовж внутрішньої поверхні матриці для двох випадків: $l/L = 0,250$ та $l/L = 0,550$.

Як видно, при пресуванні виробу більшої висоти мають місце більші значення еквівалентного напруження σ_{Mo} , особливо відчутне це збільшення у центральній зоні матриці, яка знаходиться на одному рівні із заготовкою. Різниця у цих значеннях складає приблизно 20%. Відзначимо, що за усіх розглянутих варіантів висоти заготовки матриця залишається працездатною. Також відзначимо, що у випадку заготовки найбільшої висоти ($l/L = 0,550$) на ділянці поверхні матриці, порівнянному за розмірами з пресованою заготовкою, еквівалентні напруження σ_{Mo} змінюються слабо, в цьому випадку можна стверджувати, що ця ділянка внутрішньої поверхні матриці навантажена практично рівномірно. При зменшенні висоти пресованого виробу, знижуються як максимальні напруження, що діють в матриці (в середньому на 4% при кожному наступному розмірі пресованого виробу), так і збільшується неоднорідність розподілу напружень уздовж внутрішньої поверхні матриці.

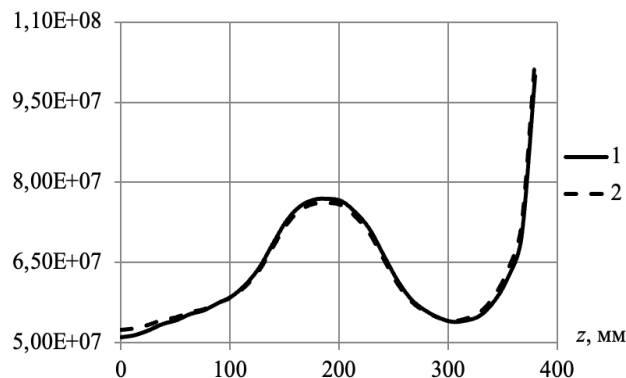


Рис. 6. Розподіл еквівалентних напружень згідно критерію Кулона-Мора вздовж внутрішньої поверхні матриці: 1 – пресування суцільних виробів, 2 – пресування порожнистих виробів; ($l/L = 0,250$)

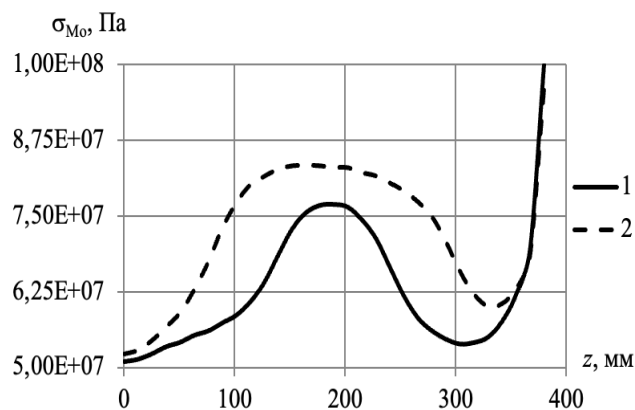


Рис. 7. Розподіл еквівалентних напружень згідно критерію Кулона-Мора вздовж внутрішньої поверхні матриці при різних розмірах пресованого виробу: 1 – $l/L = 0,250$; 2 – $l/L = 0,550$

Висновки. В роботі розглянуті питання розрахункового аналізу міцності складених прес-форм, призначених для виготовлення шляхом гарячого ізостатичного пресування виробів з порошків надміцних тугоплавких сполук. Розглянуто прес-форми для виготовлення суцільних та порожнистих виробів. Чисельні дослідження виконані із застосуванням методу скінчених елементів, поміж складових перс-форми враховані умови контактної взаємодії. Розрахунковим шляхом визначені найбільш навантажені елементи прес-форм та встановлені межі значень конструктивних параметрів, при яких прес-форми залишаються працездатними.

Подальші дослідження стосуються розрахунків деформування прес-форм з урахуванням залежності фізико-механічних властивостей від рівня температури.

Список літератури:

1. Thümmeler F., Oberacker R. An introduction to powder metallurgy. CRC Press., 2024. 325 p.
2. Angelo P. C., Subramanian R., Ravisankar B. Powder metallurgy: science, technology and applications. PHI Learning Pvt. Ltd., 2022. 323 p.
3. Гогаєв К. О., Радченко О. К., Нгуєн К. К., Радченко Л. О. Одержання біметалів методами порошкової металургії (Огляд). *Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства*. Київ : ПІМ НАН України. 2011. Вип. 20. С. 101–107.
4. Thirupathi N., Kumar R., Kore S. D. (2022). Effect of electromagnetic force on the strength of electromagnetic impulse powder compaction. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022. Vol. 31. No. 12. P. 10021–10034.
5. 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.
6. Шеремет В. І., Втерковський М. Я., Тесля С. Ю., Соловійова 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. Coube O., Riedel H. (2000). Numerical simulation of metal powder die compaction with special consideration of cracking. *Powder Metallurgy*. 2000. Vol. 43. No. 2. P. 123–131.
11. Thirupathi N., Kumar R., Kore S. D. Non-coupled finite element modelling of electromagnetic radial compaction of pure Aluminium powder. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2023. Vol. 24. No. 3. P. 325–336.
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.

Lavinsky D.V., Anischenko G.O., Konkin V.M., Konokhov V.I. COMPUTATIONAL STRENGTH ANALYSIS OF FOLDED MOLDS FOR PROCESSING HEATED POWDER MATERIALS

The paper considers the computational analysis of the strength of composite molds for isostatic pressing of heated powder materials. Isostatic pressing of heated powders of high-strength materials in composite molds made of carbon-carbon composite materials is one of the modern directions of the processing branches of mechanical engineering. The key point of intensification of technological processes is the increase in the force effect on the workpiece, which, in turn, leads to an increase in the force effect on the mold elements. The computational analysis of the deformation of the mold together with the workpiece allows us to make recommendations regarding the rational values of the structural and operational parameters, under which, firstly, the equipment remains operational, and, secondly, the goal of the technological operation is achieved. The article considers computational studies of the thermoelastic deformation of the “assembled mold – workpiece” system in order to assess the strength of the equipment elements. The case of uniform heating of the workpiece and the elements of the mold was considered. Computational studies were carried out using the finite element method. The basic one was an axisymmetric four-node isoparametric finite element with a bilinear approximation of temperature and displacements. The contact interaction is modeled by introducing layers of special contact finite elements, which were introduced between the components of the mold and between the mold and the workpiece. To assess the strength of the mold elements, the Coulomb-Mohr criterion was used. The equivalent stress according to this criterion was compared with the limit values of strength. The results of calculations are presented, illustrating the main characteristics of the stress-strain state in the mold elements. A series of calculations was performed, in which the dimensions of the mold elements and their influence on the strength indicators were varied.

Key words: computational analysis, strength, thermal deformation, isostatic pressing of powder materials, contact interaction, finite element method.