



УДК 621.762 : 669.701

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-1-23-29>

Научная статья

Research article



Оценка напряженного состояния холоднопрессованного брикета уплотнителя для газокompрессорной установки

А. А. Джафарова Азербайджанский технический университет
Азербайджан, AZ 1073, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25 afetceferova8@gmail.com

Аннотация. Методом конечных элементов анализируется распределение остаточных напряжений в осесимметричных заготовках уплотнителя газокompрессорной установки к концу прессования. Представлена схема расчета, основанная на полученной информации по изолиниям эквивалентных напряжений. Дается зависимость напряженно-деформированного состояния от контактных условий прессовки с матрицей. На основании полученной информации показаны изолинии эквивалентных напряжений (МПа) по критерию Мизеса. Установлено, что на разных участках напряженное состояние близко к предельному и может привести к видимому разрушению брикета и расслоению его боковой поверхности. Это подтверждает результаты работ по получению высокоплотных порошковых прессовок путем однократного холодного прессования. При решении задачи получения высокоплотной порошковой детали вводной информацией являлось известное распределение напряжений в уплотненном брикете. Такие данные возможно получить из некоторых широко представленных методик, особенно для состояния холодного прессования в твердых матрицах деталей сложной конфигурации. Произведен расчет напряженно-деформированного состояния порошкового брикета на контактной поверхности прессовки с твердой матрицей для высокого и безграничного трений. На некоторых участках значительное напряженное состояние способно спровоцировать скрытое или видимое разрушение, например разрыв «конечного слоя» или же расслоение боковой поверхности. Результаты численных исследований приемлемы и для низкомолекулярных порошковых материалов, спрессованных в массивных матрицах. Описанная методика расчета остаточных напряжений была разработана специальной программой в IBM и была использована при проведении исследований напряженного состояния прессуемых заготовок в условиях упругой разгрузки.

Ключевые слова: холодное прессование, остаточное напряжение, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, схема расчета, уплотнитель, матрица, порошковый материал

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда науки Азербайджана – грант № AEF-MGC-2024-2(50)-16/01/1-M -01.

Для цитирования: Джафарова А.А. Оценка напряженного состояния холоднопрессованного брикета уплотнителя для газокompрессорной установки. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2025;19(1):23–29.
<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-1-23-29>

Evaluation of the stress state in a cold-pressed seal briquette for a gas compressor unit

A. A. Jafarova 

Azerbaijan Technical University
25 H. Javid Prosp., Baku, AZ 1073, Azerbaijan

 afetceferova8@gmail.com

Abstract. The finite element method is employed to analyze the distribution of residual stresses in axisymmetric preforms of a gas compressor seal at the final stage of compaction. A computational scheme is presented, based on the obtained data on equivalent stress isolines. The dependence of the stress-strain state on the contact conditions between the compact and the die during pressing is examined. The obtained data illustrate equivalent stress isolines (MPa) according to the Mirolyubov criterion. It was established that in various sections, the stress state approaches the critical limit, which may lead to visible fracture of the briquette and delamination of its lateral surface. This finding confirms the results of previous studies on obtaining high-density powder compacts via single-step cold pressing. When solving the problem of producing a high-density powder component, the initial input data included a previously known stress distribution in the compacted briquette. Such data can be obtained from widely established methodologies, particularly for cold pressing in rigid dies for components with complex geometries. The stress-strain state of the powder briquette was computed at the contact surface between the compact and the rigid die under high and infinite friction conditions. In certain regions, significant stress levels can provoke hidden or visible failure, such as rupture of the “terminal layer” or delamination of the lateral surface. The results of numerical investigations are also applicable to low-modulus powder materials compacted in massive dies. The described method for calculating residual stresses was developed using a specialized IBM software program and was utilized for stress state analysis of compacted preforms under elastic unloading conditions.

Keywords: cold pressing, residual stress, stress-strain state, finite element method, computational scheme, seal, die, powder material

Acknowledgements: This work was supported by the Azerbaijan Science Foundation-Grant № AEF-MCG-2024-2(50)-16/01-M-01.

For citation: Jafarova A.A. Evaluation of the stress state in a cold-pressed seal briquette for a gas compressor unit. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2025;19(1):23–29. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-1-23-29>

Введение

Изготовление деталей и полуфабрикатов из металлических и других порошков в закрытой пресс-форме путем холодного прессования неспеченных брикетов сопровождается образованием значительных технологических напряжений. После удаления верхнего прессующего пуансона в матрице еще наблюдается упругое «расширение» брикета, которое в основном происходит при внезапном изменении напряженно-деформированного состояния «сырой» прессовки. Как известно, такие растягивающие напряжения могут привести к разрушению целой зоны или же верхнего слоя прессовки [1; 2]. Основываясь на литературных данных, можно отметить, что в прессованных деталях состояние упругого последующего действия мало изучено [1–3]. В связи с этим, учитывая указанное явление, с целью прогнозирования прочности спрессованных изделий разработка методики расчета их напряженно-деформированного состояния является актуальной проблемой. Именно в «сырой» прессовке закладывается качество ее спекания при различных температурных режимах холодного прессования и условиях нагрева. В работах [4–6]

показано, что в процессе прессования смесей на основе железа при высоких давлениях прессования затрудняется эвакуация газа (воздуха) из спрессованного брикета.

Основной целью работы являлся анализ распределения остаточных напряжений к концу холодного прессования в осесимметричных порошковых заготовках уплотнителя газокomppressorной установки.

Оценка остаточных напряжений

Анализировалось распределение остаточных напряжений методом конечных элементов в осесимметричных прессовках уплотнителя после удаления пуансона. Аналитический подход значительно осложняется физической нелинейностью данной проблемы. Предложенный нами алгоритм учитывает напряженное состояние прессовки в последний момент уплотнения, упругую релаксацию контактного (сила и кинематика) и других условий в спрессованных брикетах. Создаются высокие растягивающие давления, которые в процессе освобождения прессовки из матрицы приводят к значительному разуплотнению и даже разрушению брикета. Поэтому в работе [7] предложены

устройство и методика интенсификации дренажирования воздуха из зоны прессования при прессовании порошковой смеси под высокими давлениями. Соответственно, при получении высокоплотных порошковых изделий требуется знание уровня остаточных напряжений в разных зонах прессовки. Именно на основе этой информации может быть построена дальнейшая технологическая цепь изготовления высокоплотных порошковых изделий сложной конфигурации.

В процессе упругой релаксации определение напряженного состояния прессовки осуществлялось постановкой конечно-элементной задачи с использованием метода конечных элементов, включающего в себя:

– варьирующее уравнение Лагранжа [8–10]:

$$\int_V \delta \{ \varepsilon \}^T \{ \sigma \} dv - \int_{S_f} \delta \{ u \}_{S_f}^T \{ F \}_f dS_f = 0; \quad (1)$$

– уравнение материала при наличии начальных напряжений:

$$\{ \sigma \} = \begin{bmatrix} \sigma_\varphi \\ \sigma_T \\ \sigma_z \\ \tau_{rz} \end{bmatrix} = [B] \{ \varepsilon \} + \{ \sigma^0 \}, \quad (2)$$

$$\{ \varepsilon \} = \begin{bmatrix} \varepsilon_\varphi \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{rz} \end{bmatrix} = [L] \{ u \}, \quad (3)$$

$$\text{где } [L] = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix} - \text{дифференциальный оператор;}$$

– уравнение, аппроксимирующее перемещение внутри элемента его узлов:

$$\{ u \} = \begin{Bmatrix} u_r \\ u_z \end{Bmatrix} = [N] \{ x \} = [N] \begin{Bmatrix} x_i \\ x_j \\ x_R \end{Bmatrix}; \quad (4)$$

– контактные условия в системе «прессовка–матрица» с учетом силы трения на контактной поверхности:

$$\{ F \}_f = f \{ \sigma_n \} S_f. \quad (5)$$

Кинематическая задача (контактируемость), под которой понимаются необходимые предельные условия (односторонние), учитывается при анализе и построении модели [11]. Для жесткой матрицы эти условия могут быть записаны как условия «непроницаемости»:

$$\{ u_r \}_{r=R} = 0 \dots \{ \sigma_r \}_{r=R} < 0, \quad (6)$$

$$\{ u_z \}_{z=0} = 0 \dots \{ \sigma_z \}_{z=0} < 0;$$

$$\{ u_r \}_{r=R} < 0 \dots \{ \sigma_r \}_{r=R} > 0, \quad (7)$$

$$\{ u_z \}_{z=0} > 0 \dots \{ \sigma_z \}_{z=0} > 0.$$

В формулах (1)–(7) величины $\{ \sigma \}$, $\{ \varepsilon \}$ – соответственно тензоры остаточных напряжений и деформаций; $\{ \sigma^0 \}$ – тензор напряжений в прессовке в конечный момент уплотнения; $\{ u \}_{S_f}$ – вектор перемещения узлов элементов на поверхности трения (между прессовкой и матрицей в начальный и конечный моменты); $[B]$, $[N]$ – матрица упругой константы материала прессовки и функция «формы» конечного элемента, определяемая на основе [12]; $\{ F \}_f$ – сила трения, воздействующая на равномерную поверхность контакта; $\{ x \}$ – вектор перемещения узлов конечных элементов; f – коэффициент трения; $\{ \sigma_n \} S_f$ – нормальные напряжения на поверхности контакта «прессовка–матрица»; x , T , δ – символы операторов умножения, транспортирования и вариации.

С учетом (2)–(4) уравнение (1) для метода конечных элементов возможно записать в традиционной форме:

$$[K] \{ x \} = \{ R \}_{\sigma^0} + \{ R \}_f, \quad (8)$$

где $[K]$ – общая матрица жесткости [11]; $\{ R \}_{\sigma^0} = \int [B]^T \{ \sigma^0 \} dv$ – вектор силы узлов, обусловленных присутствием напряжений $\{ \sigma^0 \}$ в прессовке; $[B] = [L][N]$; $\{ R \}_f = \int_{S_f} [N]^T \{ F \}_f dS_f$ – вектор силы узлов, зависящих от силы трения.

Таким образом задача, сформулированная в (1)–(7), сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (8) с учетом смещения узлов конечных элементов [13].

Однако в целом, из-за неопределенности вектора $\{ R \}_f$, задача является нелинейной. Поэтому расчеты предлагается вести поэтапным методом, основанным на последовательности решения обычной теории упругости с коррекцией силы трения и проверкой условий (6), (7) на определенном этапе.

На первом этапе к узлам элементов прикладываем вектор $\{ R \}_{\sigma^0}$ и силу трения $\{ R \}_f$, для их решения используем эпюру нормальных напряжений в зоне $\{ \sigma^0 \}$, затем, решая уравнение (8), находим компо-

ненты $\{x\}$, $\{\sigma\}$, $\{g\}$ напряженно-деформированного состояния прессовки. Они соответствуют удалению верхнего торца от прессующих сил в условиях сил трения, первоначально действующих на поверхность брикета [14]. Корректируя вектор сил трения из системы $\{\sigma\}_1$ на «новые» нормальные напряжения, повторяем процедуру решения до необходимой точности результата. Далее, как показывает числовой эксперимент, целесообразно проверить условия связности, а условия «непроницаемости» (6), (7) выполняются во всех процессах решения задачи. В результате, после удаления прессуемых внешних сил в состоянии начальных напряжений $\{\sigma^0\}$, получаем остаточные напряжения и распределение деформаций в прессовке [15].

При решении поставленной задачи вводной информацией является известное ранее распределение напряжений в уплотненном брикете. Такие данные возможно получить из некоторых широко представленных методик, особенно для состояния холодного прессования в твердых матрицах [16; 17]. С нашей стороны, было использовано аналогичное решение.

Например, для $H_0/D = 1,5$, где H_0 – высота сжатого цилиндра, D – его диаметр (рис. 1), исследовалось напряженно-деформированное состояние пропорционально-цилиндрического уплотнителя для газокomppressorной установки [18]. Полуфабрикат был получен прессованием композита на основе порошка железа, содержащего 2 мас. % порошка графита, под максимальным давлением $P = 1000$ МПа на пуансон.

При этом коэффициент трения определялся из зависимости

$$f = A + B\sigma_0^k, \quad (9)$$

где A , B – константы материала; σ_0^k – среднее давление в элементах контактного слоя.

В расчетах были использованы средние значения упругих констант материала по объему прессовки: модуль Юнга – $E = 4$ ГПа и коэффициент Пуассона – $\nu = 0,4$.

Дискредитация осесимметричной заготовки осуществляется окружающими элементами треугольного сечения. Сборка сетки конечных элементов дается в местах самых больших концентраций напряжений, т.е. на боковой поверхности и свободном торце прессовки [19].

Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния для вариантов силовых условий на контактной поверхности «прессовка – твердая матрица» (рис. 2, а, б): для высокого трения, когда осевое смещение точек контактной поверхности брикета запрещено, т.е. $\{u_x\}_{S_f} = 0$; для трения, определенного зависимостью (5), когда $\{u_x\}_{S_f}$ – безгранично.

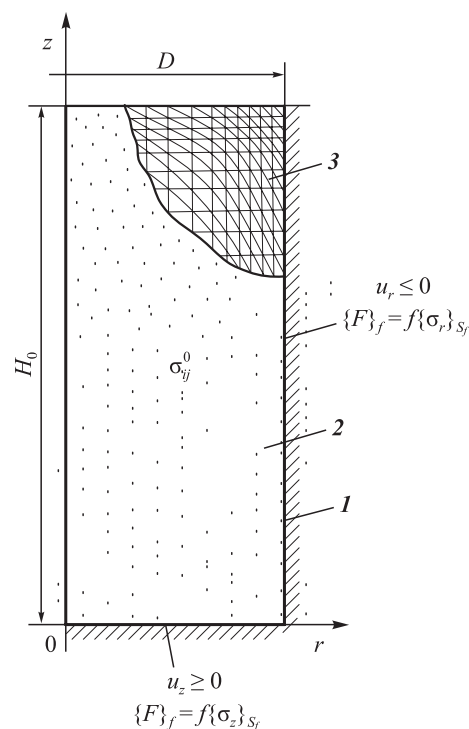


Рис. 1. Схема расчета

1 – жесткая матрица, 2 – прессовка, 3 – сетка

Fig. 1. Calculation scheme

1 – rigid die, 2 – compact, 3 – mesh

На рис. 2 показана «натуральная» форма заготовки после разгрузки. Штрихом обозначены некоторые сечения брикета до разгрузки, а точками – состояние узлов конечных элементов тех самых сечений после удаления пуансона.

Расчеты показывают, что повторное распределение напряжений, во многих случаях, сопровождается появлением внутренних растягивающих напряжений [20]. Например, в элементах зоны I имеем $\sigma_1 > 0$, а в заштрихованной зоне II – $\sigma_1 > 0$, $\sigma_0 > 0$, (см. рис. 2, а), где σ_1 – самое высокое напряжение на плоскости rz , σ_0 – среднее нормальное напряжение (I – ячейка сжатия).

Здесь в элементах поверхностного слоя и радиальное (σ_r), и окружное (σ_ϕ) напряжения были положительными. Кривые 1, 2 на рис. 2 отражают изменение этих напряжений на поверхности свободного торца уплотнителя. Напряженно-деформированное состояние брикета характеризуется развитой зоной $\sigma_1 > 0$ в условиях реально близких разгрузок, в закрытых «углах» прессовки – концентрацией зон $\sigma_1 > 0$, $\sigma_0 > 0$, возникновением растягивающих напряжений σ_ϕ в боковом слое открытого торца (рис. 2, в).

Для оценки прочности прессовки после упругой разгрузки используется критерий Миролубова в следующем виде [21]:

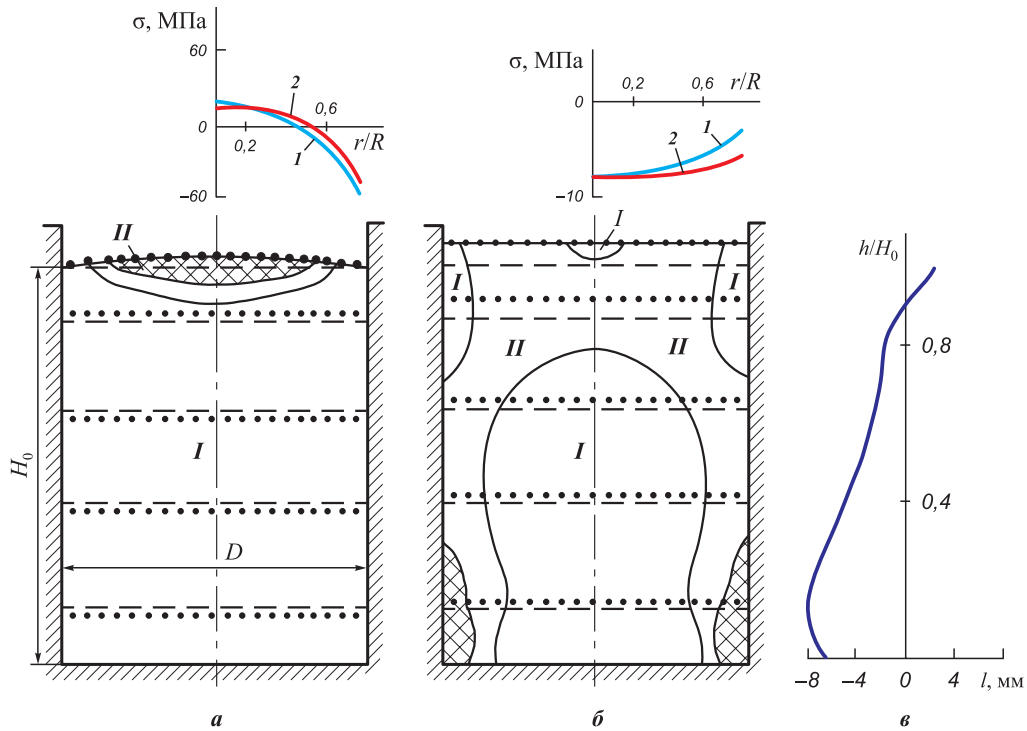


Рис. 2. Зависимость напряженно-деформированного состояния прессовки с матрицей от контактных условий
а – натуральная форма заготовки после разгрузки; **б** – изменение напряжений на поверхности свободного торца заготовки;
в – растягивающие напряжения в боковом слое свободного торца
I – зона сжатия, **II** – зона, свободная от напряжений
1, 2 – изменение радиального и окружного напряжений
h/H₀ – отношение конечной высоты брикета к первоначальной

Fig. 2. Dependence of the stress-strain state of the compact on contact conditions with the die

a – natural shape of the preform after unloading; **б** – stress variation on the surface of the free end of the preform;
в – tensile stresses in the lateral layer of the free end
I – compression zone, **II** – stress-free zone
1, 2 – variation of radial and circumferential stresses
h/H₀ – ratio of the final briquette height to its initial height

$$\sigma_e = \frac{3(1-\lambda)}{2} \sigma_0 + \frac{1+\lambda}{2} \sigma_i, \quad (10)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; $\lambda = \sigma_d^p / \sigma_d^s$, σ_d^s – граничные напряжения в условиях простого растяжения и сжатия.

На рис. 3 показано распределение остаточных эквивалентных напряжений σ_e в условиях разгрузки при $\lambda = 0,15$ [22]. Состояние наибольшей нагрузки в прессовке образуется в объеме дна после удаления пуансона: при растяжении – в слоях стен, при сжатии – в центральной части.

На указанных участках напряженное состояние близко к предельному и может привести к скрытому или же видимому разрушению – например, разрыву «конечного слоя» или расслоению боковой поверхности [23].

Следует отметить, что результаты численных исследований приемлемы и для низкомодульных порошковых материалов, спрессованных в массивных матрицах.

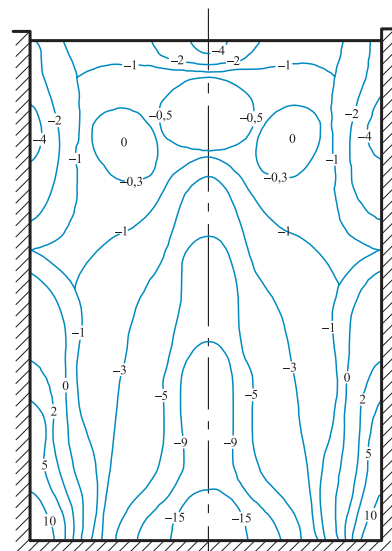


Рис. 3. Изолинии эквивалентных напряжений по критерию Миролюбова

Fig. 3. Isolines of equivalent stresses according to the Mirolyubov criterion

Заключение

Постановкой конечно-элементной задачи установлено напряженно-деформированное состояние прессовки к концу холодного прессования. Эта задача сводится к решению системы линейно-алгебраических уравнений с учетом смещения узлов конечных элементов. Выявлено, что наибольшая нагрузка в прессовке образуется в объеме дна после удаления пуансона: при растяжении – в слоях стен, при сжатии – в центральной части прессовки.

Список литературы / References

- Griqoriev S.N., Dmitriev A.M., Korobova N.V., Fedorov S.V. A cold-pressing method combining axial and shear flow of powder compaction to produce high-density iron parts. *Technologies*. 2019;7(4):70. <https://doi.org/10.3390/technologies7040070>
- Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Бадалян А.Ж. Разработка и исследование технологии формования на специализированных прессах с последующим спеканием высокоплотных деталей из порошков на железной основе. *Записки Горного института*. 2019;236:216–228. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.2.216>
 Dmitriev A.M., Korobova N.V., Badalyan A.Z. Development and research of formation technologies on specialized presses with subsequent sintering of high-density details from iron-based powders. *Journal of Mining Institute*. 2019;236:216–228. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.2.216>
- Ferreira S.C., Conde A., Arenas M.A., Rocha L.A., Velhinho A. Anodization mechanism on SiC nanoparticle reinforced al matrix composites produced by power metallurgy. *Materials*. 2014;7(12):8151–8167. <https://doi.org/10.3390/ma7128151>
- Chauhan S., Verma V., Prakash U., Tewari P.C., Khan-duja D. Studies on induction hardening of powder-metallurgy-processed Fe–Cr/Mo alloys. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*. 2017;24(8):918–925. <https://doi.org/10.1007/s12613-017-1478-2>
- Mamedov A.T., Mamedov V.A. Phenomenological approach to the plastic deformation of metallic powders in confined cavity. *News of ANAS: Science and Innovation Series*. 2012;1(9):67–72.
- Дмитриев А.М., Коробова Н.В. Исследование перспективных технологий для крупносерийного производства деталей из порошковых сталей. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018; (7(757)):46–53.
 Dmitriev A.M., Korobova N.V. A study of advanced processes for large-scale production of parts from powder steels. *Metal Science and Heat Treatment*. 2018; 60(7):457–463. <https://doi.org/10.1007/s11041-018-0301-7>
- Jafarova A.A. Compaction of elastoplastic iron batch in pressing. *Russian Engineering Research*. 2023;43(9): 1095–1100. <https://doi.org/10.3103/S1068798X23090101>
- Montes J.M., Cuevas F.G., Cintas J., Torres Y. Powder compaction law for cold die pressing. *Journal Granular Matter*. 2010;12(6):617–627. <https://doi.org/10.1007/s10035-010-0203-x>
- Xu C., Liu F., Huang L., Jiang L. Dependence of creep performance and microstructure evolution on solution cooling rate in a polycrystalline superalloy. *Metals*. 2018;8(1):4. <https://doi.org/10.3390/met8010004>
- Mammadov A., Mammadov V. Comparative analysis of diffusion metallization coatings applied on steel parts. *Metallurgical and Materials Engineering*. 2023; 29(4):43–54. <https://doi.org/10.56801/MME1020>
- Justino J.G., Alves M.K., Klein A.N., Al-Qureshi H.A. Constitutive model for the elastic-plastic analysis of porous sintered materials. *International Journal of Machine Tools Manufacture*. 2004;44(14):1471–1479. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.05.006>
- Al-Qureshi H.A., Galietto A., Klein A.N. On the mechanics of cold die compaction for powder metallurgy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005;166(1): 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.08.009>
- Мамедов А.Т., Рустамова С.М. Влияние температуры промежуточного спекания на свойства порошковых материалов. *Вестник машиностроения*. 2018;(2):48–51.
 Mamedov A.T., Rustamova S.M. Influence of intermediate sintering temperature on the properties of powder materials. *Vestnik mashinostroeniya*. 2018;(2):48–51. (In Russ.).
- Богатов А.А. Остаточные напряжения и разрушение металла. В сб.: *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении: Материалы 6-й Междунар. молодежной науч.-практ. конференции* (г. Екатеринбург, 29 октября – 1 ноября 2012 г.). Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. С. 95–101. <https://elar.urfu.ru/handle/10995/33248>
- Гнучий Ю.Б. К решению контактных задач теории упругости и пластичности. *Проблемы прочности*. 2012;(12):99–104.
 Gnuchii Yu.B. To the solution of contact problems of the theory of elasticity and plasticity. *Problemy prochnosti*. 2012;(12):99–104. (In Russ.).
- Генералов М.Б., Степанова А.Р. Исследование процесса уплотнения порошковых материалов в глухой матрице. *Известия вузов. Машиностроение*. 1988; (11):110–114.
 Generalov M.B., Stepanova A.R. Study of the compaction process of powder materials in a blind matrix. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 1988;(11):110–114. (In Russ.).
- Радомысльский И.Д., Печентковский Е.Л. Влияние прессующего инструмента на распределение плотности в металлокерамических материалах типа втулок. *Порошковая металлургия*. 1970;(4):13–19.
 Radomyselsky I.D., Pechentkovsky E.L. Influence of the pressing tool on the density distribution in metal-ceramic materials such as bushings. *Powder Metallurgy*. 1970;(4):13–19. (In Russ.).

18. Двилис Э.С., Чартпук П., Хасанов О.Л., Соколов В.М., Ешетов Б.А. Аналитическая и модельная оптимизация кинематических схем равномерноплотного прессования порошковых материалов. *Известия Томского политехнического университета*. 2013;323(2):49–55.
Dvilis E.S., Chartpuk P., Khasanov O.L., Sokolov V.M., Eshetov B.A. Analytical and model optimization of kinematic schemes of uniformly dense pressing of powder materials. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013;323(2):49–55. (In Russ.).
19. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970, 710 с.
20. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. С. 426–428.
21. Поздnev А.А., Няшин Ю.И., Трусов В.П. Остаточные напряжения: теория и приложения. М.: Наука, 1982. С. 94–97.
22. Москвитин В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов. М.: Наука, 2002. С. 76–79.
23. Калинин А.Е., Вахрушев А.В., Кургузкин М.Г. Долговечность и ползучесть разносопротивляющегося композита в условиях плоского напряженного состояния. В сб.: *Тезисы докладов V Всесоюз. конференции по механике полимерных и композитных материалов*. Рига: Зинатне, 2003. С. 77–80.

Сведения об авторе



Information about the Author

Афет Ариф кызы Джафарова – к.т.н., доцент кафедры «Химическая технология, переработка и экология» Азербайджанского технического университета

 **ORCID:** 0000-0003-4842-8906

 **E-mail:** afetceferova8@gmail.com

Afet Arif Jafarova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department “Chemical technology, processing and ecology” of the Azerbaijan Technical University

 **ORCID:** 0000-0003-4842-8906

 **E-mail:** afetceferova8@gmail.com

Статья поступила 15.08.2024 г.
Доработана 06.01.2025 г.
Принята к публикации 09.01.2025 г.

Received 15.08.2024
Revised 06.01.2025
Accepted 09.01.2025