



Конечно-элементное моделирование электроконтактного спекания правящих фильер строительной арматуры

Г.Г. Горанский¹, А.И. Поболь²

АННОТАЦИЯ:

Разработана математическая модель процесса электроконтактного спекания (ЭКС) твердосплавных композиций при изготовлении правящих фильер строительной арматуры. Модель позволяет рассчитать уплотнение прессовки, диаграмму послойного распределения плотности, диаграммы полей температур и давлений, распределение плотности тока по сечению прессовки и его изменение в зависимости от относительной плотности. Апробированные в модели аналитические зависимости распространены на произвольную геометрию фильер при помощи конечно-элементного моделирования с корректировкой свойств материала по аналитическим зависимостям, исходя из плотности прессовки. Оценка адекватности модели проведена по кривой прессуемости. Результатами расчетов доказан и экспериментально подтвержден эффект снижения термобарических параметров компактирования спекаемой твердосплавной композиции при ее модифицировании термоактивирующей добавкой, благодаря чему повышена стойкость керамических пресс-форм и на 40% снижен процент брака. Спрогнозированы растягивающие радиальные деформации вдоль конической поверхности заготовки фильеры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

математическая модель; электроконтактное спекание; правящие фильеры

1. Введение

Все более широкое использование в строительной индустрии Беларуси и за рубежом армированных железобетонных конструкций увеличивает спрос на правящие и калибрующие фильеры при производстве стальной арматуры. Изготовление фильер из порошковой шихты на основе твердого сплава целесообразно выполнять методом ЭКС [1]. Определение оптимальных режимов и схем ЭКС твердосплавных композиций, обеспечивающих высокие механические свойства по всему макрообъему фильер, различающихся формой и размером, является актуальной научной и прикладной задачей. Эмпирический поиск рациональных технологических схем и режимов ЭКС с целью сокращения времени, материальных и трудовых затрат целесообразно предварить разработкой модели процесса.

Аналитические модели консолидации порошковых материалов, описывая кинетику электрического сопротивления пористого образца, размеры межчастичных контактов, распределение температуры и плотности в прессовке на разных стадиях процесса, подходят для объектов с регулярной геометрией и постоянством сечений [2]. Для более сложных форм фильер уместным представляется имитационное моделирование методом конечных элементов.

¹ ГП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник», эл. почта: georggoran@rambler.ru, orcid id: 0000-0001-8883-1201

² ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси», эл. почта: alex.pobol@gmail.com, orcid id: 0000-0002-8426-8252

Целью работы является создание конечно-элементной модели процесса ЭКС твердо-сплавных порошковых композиций, позволяющей рассчитать уплотнение прессовки, диаграмму послойного распределения плотности, диаграммы полей температур и давлений, распределение плотности тока по сечению прессовки и его изменение в зависимости от относительной плотности.

2. Методика построения и алгоритм модели

Порошковым композициям свойственны специфические особенности, затрудняющие конечно-элементное моделирование процессов их консолидации. Это связано с их двойственной природой: с одной стороны это сыпучая среда, с другой - монолитные частицы определенного материала. Процессы, происходящие в смесях, обусловлены как свойствами частиц, так и взаимодействием их между ними. Так, в частности, уменьшение объема прессовки обусловлено как деформациями отдельных частиц, так и выборкой пор между ними. Первый процесс определяется упруго пластическими свойствами компактного материала, второй - когезией сыпучей среды. Теплопередача и протекание электрических токов внутри частиц имеет один характер, между ними - иной.

Перспективной представляется методика моделирования, совмещающая достоинства аналитического и имитационного подходов [3]. Геометрия прессовки представляется конечно-элементной моделью, граничные условия обусловлены условиями технологического процесса (давление со стороны пуансонов и ограничения на перемещения со стороны стенок матрицы). Что касается модели материала, то его свойства определяются по аналитическим зависимостям, исходя из плотности прессовки. С этими данными выполняется расчет, результат которого - новое состояние, новая плотность и, соответственно, новые свойства материала. Процесс повторяется до определенного конечного состояния. Признаком последнего может служить значение плотности (пористости), размеры прессовки и др.

Учет структурных изменений порошкового тела и вытекающие из этого изменения механических свойств производится в рамках многошагового моделирования в соответствии с блок-схемой (рис. 1).

Корректируемые свойства - модуль упругости, E , предел текучести, σ , коэффициент внутреннего трения, f , удельное электрическое сопротивление, r .

В качестве опорного параметра для корректировки механических свойств в зависимости от плотности, выбрано относительное контактное сечение, α_k , которое характеризует долю материала, оказывающего реальное сопротивление усилию прессования. Это безразмерная величина, численно равная отношению суммарной проекции межчастичных контактов на плоскость, перпендикулярную направлению усилия прессования, S_k , к номинальной площади прессовки, S_n :

$$\alpha_k = S_k / S_n$$

Через характеристики пористости она определяется как

$$\alpha_k = \mathcal{G}^2 \frac{\ln(\beta_0 \mathcal{G})}{\ln(\beta_0 \beta^\alpha)}$$

где: β - относительный объем, β_0 - относительный начальный объем, \mathcal{G} - относительная плотность.

Показатель α зависит от формы образующей так называемой, «приконтактной зоны» - области частицы, непосредственно прилегающей к контакту ее с другой частицей. Если поверхность в этом месте вогнутая, $\alpha > 1$, если выпуклая - $\alpha < 1$.

Характер изменения α_k близкий к параболической зависимости. Для управления кривизной этой зависимости относительное контактное сечение можно дополнить

степенной функцией. Таким образом, для определения механических свойств сыпучего материала в зависимости от плотности, принимается выражение следующего вида:

$$M_g = \alpha_k (\vartheta)^c M$$

где: M - значение свойства материала в компактном состоянии, M_g - значение того же свойства того же материала, но в сыпучем состоянии при относительной плотности ϑ , c - показатель степени, регулирующий кривизну кривой прессуемости.

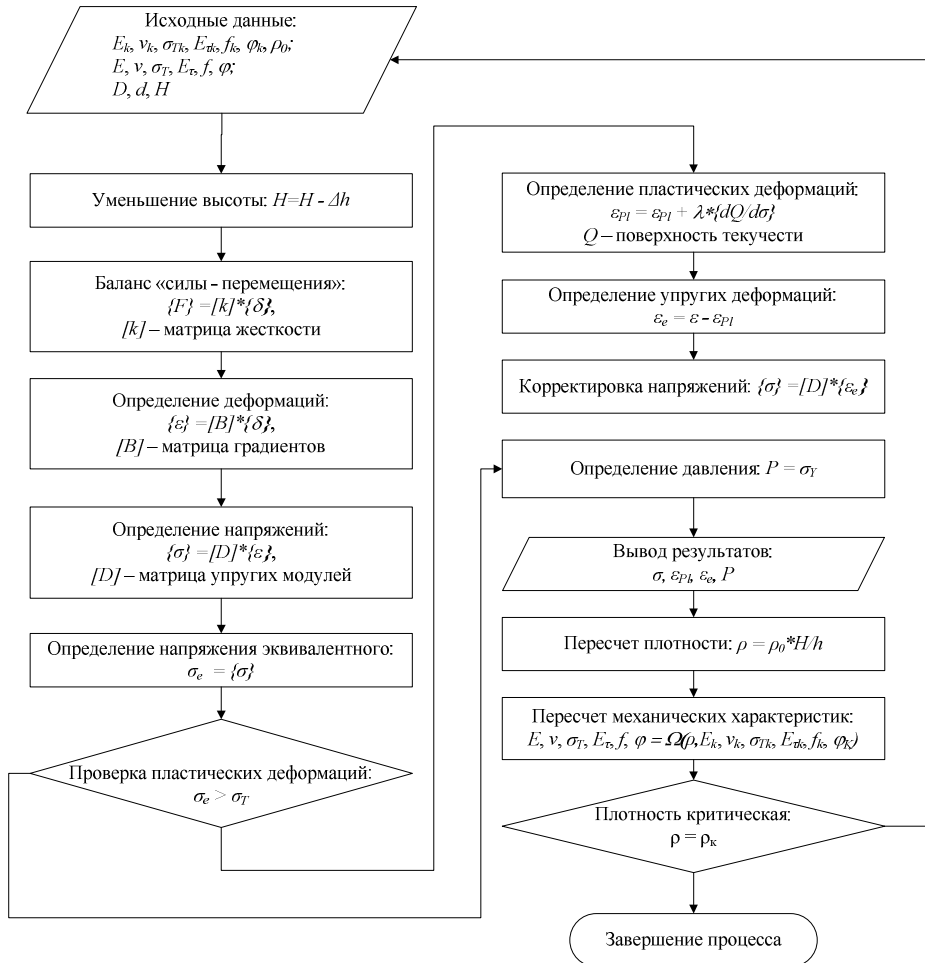


Рис. 1. Блок-схема адаптивного изменения механических свойств порошкового тела

С учетом относительного контактного сечения может быть рассчитаны напряжения в приконтактных зонах:

$$\sigma_k = \frac{\lambda(\vartheta)\sigma_{II}}{1 - B\lambda(\vartheta)\alpha_k}$$

где: $\lambda(\vartheta)$ и B - коэффициенты (агрегированные), учитывающие компоненты напряжений, обусловленные действием комбинированной контактной нагрузки, а также дополнительные напряжения:

$$\lambda(\vartheta) = 1 + \operatorname{arctg} \frac{(1 + \alpha) \ln(\beta)}{\ln(\beta_0 \vartheta)} \quad B = 1 - \frac{f_k}{f_0}$$

После этого определяется давление прессования:

$$p = (1 + f_i \operatorname{tg} \phi) \sigma_k \alpha_k$$

где: f_i - коэффициент внутреннего межчастичного трения, ϕ - угол нормального взаимодействия частиц.

Таким образом может быть получено основное уравнение прессования, связывающее давление и плотность среды.

Удельное электрическое сопротивление R_{cp} корректируется согласно работе [4]:

$$R = \frac{R_m}{n_k} \quad n_k = K_x \left\{ 1 - \left[\frac{1}{\rho_x} \left(\frac{K_x - 1}{K_x} \right)^{2/3} \right]^{2/3} \right\} \quad K_x = \frac{(0,804 - 1,07 \sin^2 \phi)}{1 + \frac{d_1}{d_2} - \sqrt{\frac{d_1}{d_2} \left(\frac{d_1}{d_2} + 2 \right)}}$$

где: R_m - сопротивление компактного материала, n_k - коэффициент уплотнения, K_x - коррекционное число, определяемое средним количеством контактов каждой частицы с окружающими, d_1 и d_2 - диаметры частиц, ϕ - угол трения.

Внутреннее трение обусловлено контактным взаимодействием частиц и определяется соотношением его составляющих - касательной, F , и нормальной P :

$$f_i = \frac{F_{ki}}{P_{ki}} \quad f_i = f_0 (1 - B \lambda(\vartheta) \alpha_k)$$

Тепло Джоуля-Ленца, выделяющееся в каждом отдельном элементе при протекании через дисперсную среду электрического тока, определяется формулой:

$$Q_e^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\rho] \cdot \{J_{ti}\} \cdot \{J_{ti}\}$$

где: n - количество точек интегрирования, $\{J_{ti}\}$ - плотность тока в точках интегрирования, $[\rho]$ - матрица сопротивлений.

Теплообмен на поверхности отдельного элемента описывается выражением:

$$\{Q_e^c\} = \int_S T_B h_f \{N\} ds$$

где: T_B - окружающая температура, $\{N\}$ - «функция формы» элемента, интерполирующая обобщенные перемещения узлов элемента на его внутренние области, h_f - коэффициент поверхностного теплообмена, зависящий от температуры порошка (таблица 1).

Таблица 1

Коэффициент теплообмена порошка на границе пуансон- электрод при разных температурах [5]

Температура [K]	300	500	700	900	1100	1300	1500
Коэффициент h_f [Дж/(м ² с)]	929	1193	1397	1597	1791	1982	2176

Тестовый объект моделирования - цилиндрическая втулка (рис. 2а), формируемая двусторонним сжатием в матрице с центральным стержнем (рис. 2б, в). Модель параметрическая - высота H , внешний и внутренний диаметры D и d , а также число слоев прессовки (рис. 2г) задаются на начальной стадии моделирования.

Моделируемый процесс квазистатический, временной фактор в рамках вычислительных экспериментов не учитывался. Вдоль оси абсцисс на графиках представлены номера расчетных шагов процесса моделирования. Значение имеет плавность перехода из начального состояния в конечное. С одной стороны - это плавность изменения свойств. С другой - упрощение вычисления баланса нагрузок и перемещений - чем меньше разница между состояниями, тем проще найти баланс при переходе из одного состояния в другое.

Для снижения вычислительных ресурсов при построении конечно-элементной модели предпринят ряд упрощений (рис. 3). Вместо полноразмерного цилиндра в расчетах используется только сектор и только верхняя половина (рис. 3а). Для узлов на боковых плоскостях сектора определено условие «симметричность» (рис. 3б). Таким образом обеспечивается целостность модели. Матрица и центральный стержень представлены поверхностными (из элементов типа «shell») моделями стенок (рис. 3в). Для узлов этих моделей ограничены все степени свободы, что делает их полностью недеформируемыми. Пуансоны, как таковые, в модели отсутствуют. Вместо них - соответствующие граничные условия (рис. 3г). Узлам верхней грани сообщается перемещение, либо к ним прикладывается давление. К ним также прикладывается электрический потенциал.

Для «нижних» узлов определено граничное условие «симметричность». Их электрический потенциал полагается равным «0». Для модели возможно использование элементов типа Solid227 (тетраэдр) и Solid226 (гексаэдр).

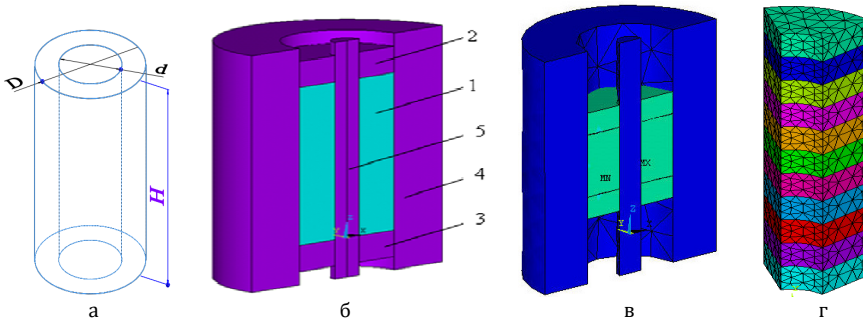


Рис. 2. Тестовый объект (а), структура модели в исходном (б) и терминальном (в) состояниях, многослойная модель дисперсного тела (г); 1 - порошковая композиция, 2, 3 - пуансоны-электроды, 4 - матрица, 5 - стержень

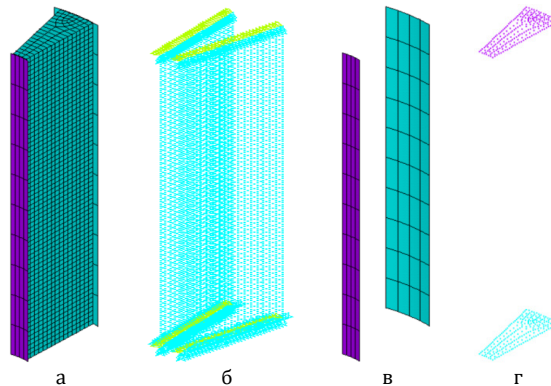


Рис. 3. Конечно-элементная модель и граничные условия

3. Результаты моделирования

В расчетах принято: температура окружающей среды и начальная температура $T_0 = 300$ К; механические, теплофизические, электрофизические свойства и размеры образца приведены в таблице 2. Верификация расчетной модели выполнялась по внешним характеристикам - воздействиям на дисперсный материал и реакциям на них: давление-перемещение пуансонов, разность потенциалов-электрический ток.

Комплексную оценку адекватности модели предоставляет кривая прессуемости - зависимость относительной плотности от относительного давления прессования. Как видно из рисунка 4, характер такой зависимости для расчетной модели близок к экспериментальной, что говорит о том, что аналитическая модель жесткости дисперсного материала претендует на достаточную сходимость с результатами реального процесса уплотнения.

Результаты расчетов изменения плотности, усредненной по объему прессовки, представлены на рисунке 5а. Показано влияние трения о стенки керамической матрицы на характер уплотнения прессовки. Слои верхней части (12, 11, 10 ...), расположенные ближе к пуансону, сжимаются больше, чем срединный слой 1 (расчет проводится как симметричный относительно центра по оси ординат). Распределение относительной плотности по слоям прессовки приведено на рисунке 5б.

Таблица 2

Механические, теплофизические, электрофизические свойства компактного материала, использованные в модели [6]

Теплопроводность [Вт/(м·К)]	Коэффициент температурного расширения [К ⁻¹ , x10 ⁻⁶]	Удельная теплоемкость [Дж/(кг·К)]	Коэффициент трения	Плотность [кг/м ³]	Удельное электросопротивление [Ом·м, x10 ⁻⁷]	Модуль упругости [ГПа]	Предел прочности [МПа]	Коэффициент Пуассона	Размеры образца, DхdхH [мм]
120	5.75	462	0.1	14950	2.5	575	1440	0.23	8х3.2х8

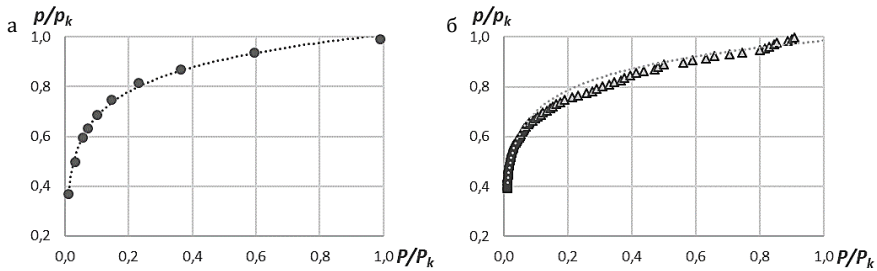


Рис. 4. Кривая прессуемости: а) экспериментальная, б) по результатам вычислений

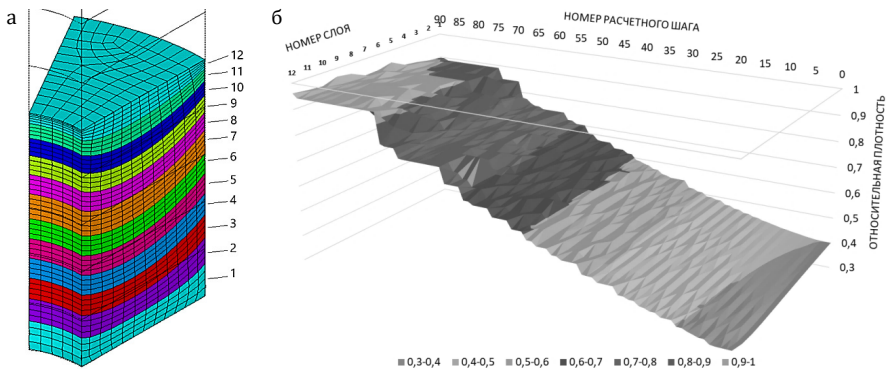


Рис. 5. Уплотнение прессовки (а) и диаграмма послойного распределения плотности (б)

Видно, что в исходном состоянии насыпная плотность увеличивается вглубь к центру образца (слой 1). В процессе компактирования плотность у пуансона растет быстрее и достигает более высоких значений за счет сил трения порошка о стенки матрицы. Подобное распределение соответствует экспериментальным данным [5], а также согласуется с аналитическими моделями [7].

Электротермическое состояние в прессовке обусловлено разностью потенциалов и электрическим сопротивлением, зависящим от относительной плотности, т.е. от распределения давления. Распределение плотности тока по сечению прессовки (рис. 6а) достаточно равномерное, с некоторым преобладанием его поверхностного протекания. График изменения электрического тока в зависимости от относительной плотности (рис. 6б) имеет ступенчатый характер, что объясняется неравносностью скорости протекающих процессов нагрева-деформаций, и как следствие, изменения свойств электросопротивления. Эта неравносность вызвана сложной взаимосвязью энергетических параметров процесса: электросопротивление-ток, ток-температура, температура-электросопротивление.

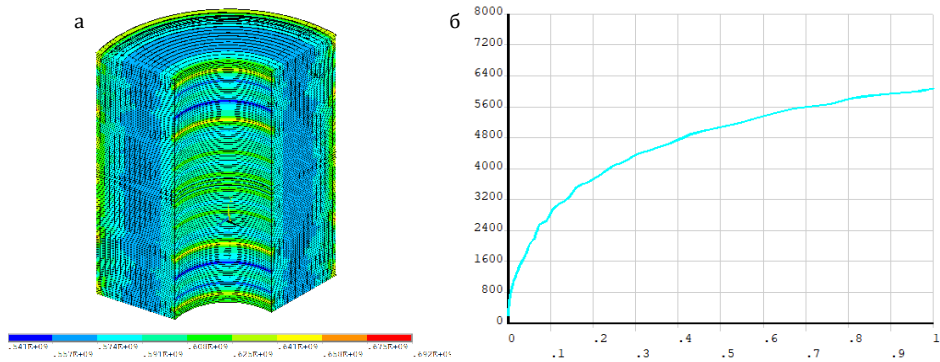


Рис. 6. Распределение плотности тока по сечению прессовки (а) и его изменение в зависимости от относительной плотности (б)

Распределения полей температур (рис. 7а) носит стандартный характер в соответствии с теорией теплопроводности и определяется главным образом скоростью распространения тепла и свойствами теплообмена со стенками керамической матрицы и пуансонами. Диаграмма давлений (рис. 7б) имеет выраженные максимумы в углах примыкания стенок матрицы к пуансонам и минимумы в центральной части прессовки, что объясняется эффектом трения о стенки. Приведенные результаты свидетельствуют об адекватности модели и позволяют прогнозировать состояние прессовок, отличающихся от полученных в рамках натурных экспериментов своей геометрией и наличием в составе твердосплавной шихты термоактивирующих модификаторов.

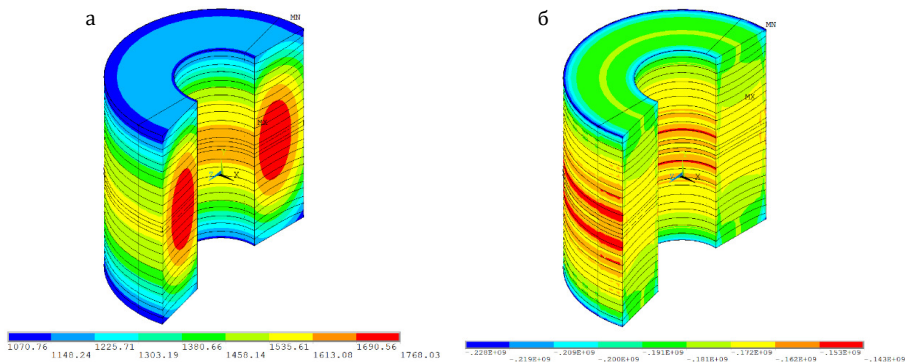


Рис. 7. Диаграммы полей температур (а) и давлений (б)

При изготовлении фильер для волочения проволоки последняя имеет коническое отверстие (рис. 8а). В этом случае модель прогнозирует наличие растягивающих радиальных деформаций вдоль конической поверхности (рис. 8б). Далее для этого случая приведены распределения параметров напряженно-деформированного состояния (рис. 8в, г) и технологических параметров (температуры и давления) (рис. 9).

Модель позволяет учесть влияние количества и состава модификаторов твердого сплава на тепловыделение и, следовательно, на механические свойства дисперсной среды. При включении нужного параметра, в зависимости от настройки, определенный процент случайно выбранных конечных элементов приобретает свойство выделения управляемого количества теплоты при достижении элементом заданной температуры.

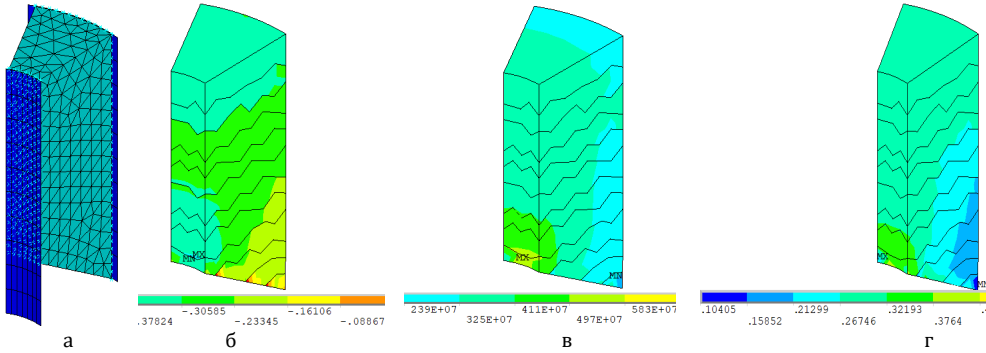


Рис. 8. Геометрическая модель конической фильеры (а), распределение радиальных деформаций (б), напряжений (в) и общих деформаций (г)

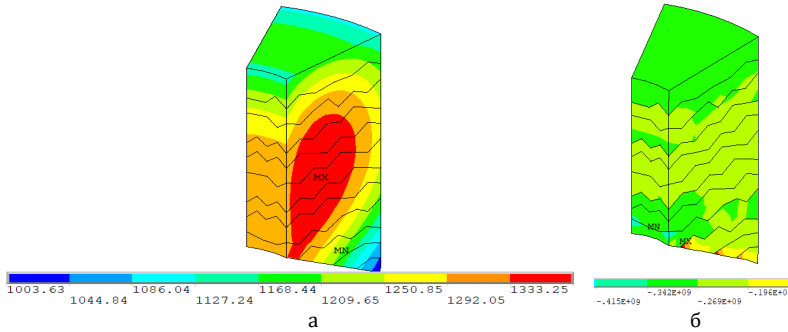


Рис. 9. Распределение температур (а) и давлений (б)

Количество теплоты определялось исходя из экспериментальных оценок аккумулированной модификатором энергии. Проведены расчеты ЭКС порошковой композиции на основе твердого сплава без и с термоактивирующим модификатором (от 1 до 15%). На рис. 10 показаны диаграммы распределения напряжений по Мизесу на финальной стадии компактирования фильеры без и с 5 масс. % термоактивирующего модификатора.

Характер распределения не меняется, максимальные значения достигаются в местах взаимодействия трех сред: керамической матрицы, металлического пуансона и дисперсной среды. Однако абсолютные значения значительно отличаются. В варианте расчета без модификатора максимальные значения эквивалентного давления достигают 50 МПа, средние - в диапазоне 17÷23 МПа, с 5% модификатора максимальные значения соответствуют 37 МПа, а средние - в диапазоне 15÷18 МПа.

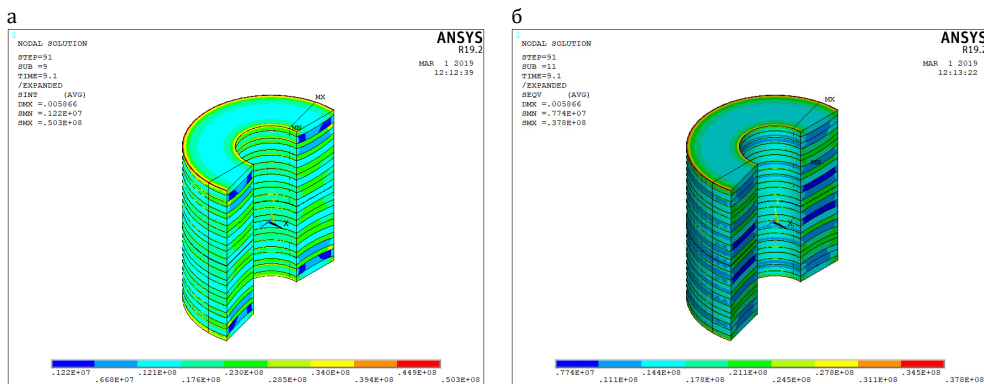


Рис. 10. Диаграмма распределения напряжений в материале твердосплавной фильеры по Мизесу на финальной стадии компактирования: а) без модификатора, б) с 5 масс. % термоактивирующего модификатора

Расчеты свидетельствуют: наличие термоактивирующего модификатора повышает температуру в микрообъемах прессовки, что, в свою очередь, существенно влияет на жесткость компактируемой среды и позволяет снизить давление прессования, требуемое для достижения максимальной плотности. Расчет без добавки прогнозирует невозможность достичь требуемой относительной плотности при давлениях ниже 50 МПа, а добавление 3÷5% модификатора позволяет снизить его до приемлемых 35÷40 МПа. Это благоприятно сказывается на стойкости керамической части пресс-формы, снижая на 40% риск ее разрушения и получения бракованного изделия.

4. Выводы

Разработана математическая модель процесса ЭКС твердосплавных композиций при изготовлении правящих фильер строительной арматуры. Модель позволяет рассчитать уплотнение прессовки, диаграмму послойного распределения плотности, диаграммы полей температур и давлений, распределение плотности тока по сечению прессовки и его изменение в зависимости от относительной плотности.

Апробированные в модели аналитические зависимости распространены на произвольную геометрию фильер при помощи конечно-элементного имитационного квазистатического моделирования с корректировкой свойств материала по аналитическим зависимостям, исходя из плотности прессовки. Оценка адекватности модели проведена по кривой прессуемости.

Результатами расчетов доказан и экспериментально подтвержден эффект снижения термобарических параметров компактирования спекаемой твердосплавной композиции при ее модифицировании термоактивирующей добавкой, благодаря чему повышена стойкость керамических пресс-форм и на 40% снижен процент брака.

Спрогнозированы растягивающие радиальные деформации вдоль конической поверхности заготовки фильеры.

Литература

- [1] Goranskiy G.G., Zhornik V.I., Pobol' A.I., Modifitsirovannyye kompozitsii na osnove otkhodov tverdogo splava dlya pravvashchikh fil'yer stroitel'noy armatury, Zeszyty Naukowe Politechniki Czestochowskiej 2018, seria Budownictwo 24, 95-101.
- [2] Goransky G.G., Sorokova S.N., Knyazeva A.G., Mathematical modeling of pulsed electric-sintering powders, Appl. Mech. Mater. 2015, 756.

- [3] G.G. Goranskiy, D.P. Kunkevich, A.I. Pabol', Modelirovaniye napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kompaktiruyemoy sypuchey sredy, Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: mezhd. nauchn.-tekhn. sb. Vyp. 32, BNTU, Minsk 2017, 79-84.
- [4] Stoyanov A.A., Yssledovaniye élektroprovodnosty porystykh materialov, Visnyk Donbas'koi derzhavnoi mashinobudivnoi akademii 2012, 4, 164-169.
- [5] Zhornik V.I., Goranskiy G.G., Pabol' A.I. i dr., Impul'snoye elektrokontaktnoye spekaniye tverdosplavnykh poroshkovykh kompozitsiy. Aktual'nyye voprosy mashinovedeniya: sb. nauch. tr., Vyp. 3, OIM NAN B, Minsk 2014, 365-370.
- [6] Knyazeva A.G., Goranskiy G.G., Pabol' A.I. i dr., Modelirovaniye protsessa impul'snogo elektrokontaktного spekaniya tverdosplavnykh poroshkovykh kompozitsiy, Khimicheskaya fizika i mezoskopiya 2015, 17, 2, 239-252.
- [7] Zhdanovich G.M., Mekhanika poroshkovykh materialov, BNTU, Minsk 2013, 420 s.

Finite-element model of electrocontact sintering of straightening dies for construction fittings

ABSTRACT:

A mathematical model of the process of electrocontact sintering of carbide compositions in the manufacture of straightening dies for construction fittings has been developed. The model allows to calculate the compression of the compact, the diagram of the layer-by-layer density distribution, the diagrams of temperature and pressure fields, the distribution of current density over the cross-section of the compact and its change depending on the relative density. The analytical dependences, tested in the model, are extended to arbitrary geometry of the dies, using finite element modeling with adjustment of material properties according to analytical dependencies, based on the density of pressing. An assessment of the adequacy of the model was carried out by the compressibility curve. The results of calculations proved and experimentally confirmed the effect of reducing the thermobaric parameters of compacting the sintered carbide composition, when it is modified with a thermosetting additive, which increased the resistance of ceramic molds and reduced the percentage of rejects by 40%. The tensile radial deformations along the conical surface of the die blank are predicted.

KEYWORDS:

mathematical model; electrocontact sintering; straightening dies