

УДК 621.762

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ШИХТ ПОРОШКОВЫХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ШНЕКОВЫХ ПРЕССАХ

© 2013 г. **Г. В. Перельман**

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова

Г. В. Перельман – аспирант мехмата МГУ. E-mail: perelman@mail.ru.

Представлена математическая модель расчета процесса вытяжки длинномерных заготовок из пластифицированных шихт порошковых и композиционных материалов на шнековых прессах через оснастки, имеющие локальное уменьшение площади сечения формирующего канала оснастки. Расчет полей напряжений в различных очагах деформации материала по всей длине канала ведется с использованием теории пластичности дискретных материалов. Показано, как, варьируя формой поверхности канала, степенью вытяжки материала в зоне локального уменьшения сечения канала и площадью сечения заготовок, подбирать их оптимальное для процесса вытяжки сочетание.

Ключевые слова: шнековый пресс, диафрагма, экструзия, напряжение, математическая модель, оптимизация.

The article describes a mathematical model of calculating the extrusion process of long powder compacts and composite materials with the help of screw presses through the facilities having local sectional area reduction of the forming channel. The stress field calculation in the various material deformation centers along the overall length of the channel is carried out with the use of the discrete theory of plasticity. It is shown how, varying the form of channel surface, material extrusion rate in the zone of local channel section reduction and the compact section area, to select their combination being optimum for extrusion process.

Key words: screw press, diaphragm, extrusion, stress, mathematical model, optimization.

Шнековые прессы широко используются для массового выпуска длинномерных заготовок из пластифицированных шихт широкой гаммы порошковых и композиционных материалов. Наряду с высокой производительностью, возможностью получать длинномерные изделия с постоянными свойствами материала по всей длине и высокой степенью деформационной обработки материала, а соответственно, и высоким качеством получаемого продукта, этот тип прессового оборудования имеет вытекающий из его конструкции серьезный недостаток. Вращающийся шнек перемещает массу по каналу шнекового тракта, как «гайку», поэтому из пресса уплотненная масса выходит в виде уплотненной «трубы», центральная полость которой имеет рыхлую структуру. Эта полость заполняется материалом по мере его перемещения по формирующей оснастке с уменьшающейся площадью поперечного сечения за счет продольной осадки «трубы», а также вследствие уменьшения диаметра дефектной зоны, согласованного с уменьшением внешнего диаметра формируемой заготовки (d_3).

Полноценное «залечивание» центральной зоны заготовки на прессах с отношением диаметра «тела» шнека к диаметру пресса $d_{ш}/d_{пр} \leq 0,38 \pm 0,43$ (рис. 1, а) достигается при степенях вытяжки

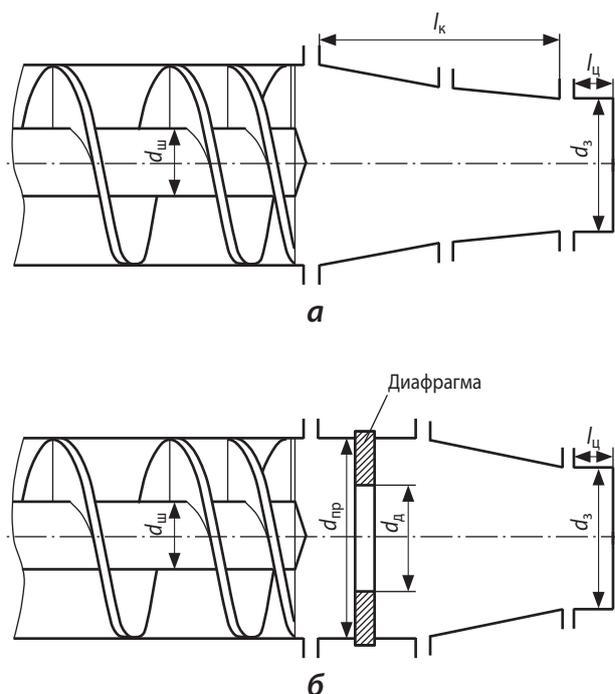


Рис. 1. Схема шнекового пресса

а – стандартная оснастка, **б** – оснастка с диафрагмой
 $d_{ш}$, $d_{пр}$, $d_{д}$, d_3 – диаметры соответственно шнека, пресса, отверстия в диафрагме и заготовки
 $l_{к}$, $l_{ц}$ – длины соответственно канала и цилиндрического калибра

(отношение площади сечения выходного отверстия прессы к площади сечения заготовки) более 6. Шихты, обладающие высокой пластичностью, позволяют избежать брака в изделиях и при менее высоких степенях вытяжки, но повышение жесткости шихт и увеличение отношения $d_{ш}/d_{пр}$ до 0,8, что имеет место в прессах, создающих давления до 40–50 МПа, исключают возможность качественного формования заготовок при вытяжках менее 7–8. Это существенно ограничивает размеры площади сечения формуемых на прессах стержневых заготовок, а повышение степени вытяжки значительно увеличивает давления прессования.

Известно [1], что такой технологический прием, как локальное уменьшение площади сечения канала формирующего тракта, позволяет увеличить габариты заготовок, выпускаемых на шнековых прессах данного типоразмера.

Однако использование известных решений для такой конфигурации деформирующего канала при освоении выпуска заготовок из новых классов материалов или при переходе на новый тип оборудования требует серьезных доработок существующих конструкций прессовой оснастки. В литературе, руководящих и справочных материалах отсутствуют данные, позволяющие хотя бы на качественном уровне с достаточной точностью оценивать вероятность получения положительного результата от внедрения такого технического решения, что всегда является серьезной проблемой при принятии решений о переходе на новую технологию производства изделий.

Для решения этой проблемы предлагается отражающая реальный характер течения материала математическая модель процесса экструзии пластифицированных материалов на шнековых прессах, формирующие оснастки которых имеют локальное уменьшение площади сечения рабочего канала (см. рис. 1, б).

В представленной модели расчеты полей напряжений в материале, продавливаемом через такие каналы, ведутся с использованием хорошо развитого математического аппарата теории пластичности сред, у которых на границах составляющих их структурных элементов механические свойства материала терпят разрывы [2]. К таким средам относятся и пластифицированные шихты порошковых и композиционных материалов.

Функции пластичности этих сред, как показано на рис. 2, хорошо описываются условием трения Кулона:

$$\tau_n = \sigma_n \operatorname{tg} \rho + K, \quad (1)$$

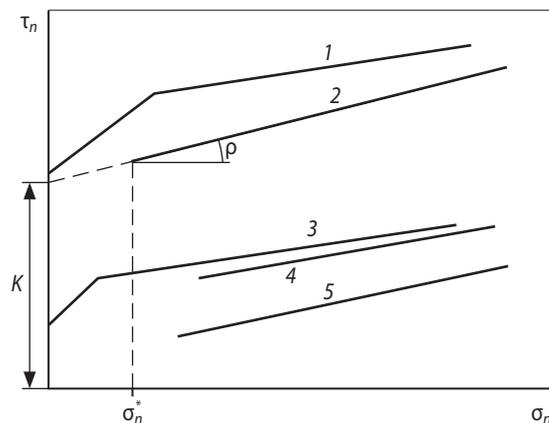


Рис. 2. Функции пластичности $\tau_n = f(\sigma_n)$ порошковых и композиционных материалов
 1 – алюминий, 2 – оксид титана без связки, 3 – оксид титана со связкой, 4 – оксид алюминия, 5 – графит черный аморфный

где τ_n – касательные напряжения на площадке с нормалью \mathbf{n} , σ_n – нормальные напряжения к этой площадке, ρ – угол внутреннего трения материала, K – коэффициент сцепления материала.

В координатах главных напряжений σ_{ij} это соотношение записывается как

$$|\sigma_i - \sigma_j| = 2K \cos \rho + (\sigma_i + \sigma_j) \sin \rho, \quad i \neq j. \quad (2)$$

В сочетании с дифференциальными уравнениями равновесия для осесимметричной схемы деформации

$$\begin{aligned} \partial \sigma_r / \partial r + \partial \tau_{rz} / \partial z + (\sigma_r - \sigma_\theta) / r = 0, \\ \partial \tau_{rz} / \partial r + \partial \sigma_z / \partial z + \tau_{rz} / r = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где r, z, θ – цилиндрические координаты; σ_θ – окружное напряжение; σ_r – радиальное напряжение; τ_{rz} – касательное напряжение на площадке, перпендикулярной оси r , получим систему дифференциальных уравнений в частных производных гиперболического типа:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial z} (\cos 2\varphi + \sin \rho) + \frac{\partial S}{\partial r} \sin 2\varphi + \frac{\partial \varphi}{\partial r} 2(S \sin \rho + K \cos \rho) + \\ + \frac{\partial \rho}{\partial z} (S \cos \rho - K \sin \rho) + \frac{\partial K}{\partial z} \cos \rho + \frac{\sin 2\varphi}{r} (S \sin \rho + K \cos \rho) = 0, \\ \frac{\partial S}{\partial z} \sin 2\varphi + \frac{\partial S}{\partial r} (\sin \rho - \cos 2\varphi) - \frac{\partial \varphi}{\partial z} 2(S \sin \rho + K \cos \rho) + \\ + \frac{\partial \rho}{\partial r} (S \cos \rho - K \sin \rho) + \frac{\partial K}{\partial z} \cos \rho + \frac{(1 - \cos 2\varphi)}{r} (S \sin \rho + K \cos \rho) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

в которой φ – угол наклона оси максимального сжимающего напряжения к оси z , $S = (\sigma_i + \sigma_j) / 2$.

Уравнения характеристик этой системы имеют вид

$$dr = \operatorname{tg}(\varphi \pm \mu) dz, \quad (5)$$

где $\mu = \pi/4 - \rho/2$.

Как следует из уравнений (5), линии характеристик, как и линии скольжения в материале [3], пересекают вектор максимального напряжения сжатия под углами $\pm \mu$.

Соотношения между функциями S и φ вдоль линий характеристик (линий скольжения) имеют вид

$$\begin{aligned} & \pm \cos \rho dS - 2C_1 d\varphi + \\ & + [C_1 \partial \rho / \partial r + \cos \rho (\partial K / \partial r) + C_1 (1 - \cos 2\varphi) / r] dz - \\ & - [C_2 \partial \rho / \partial z + \cos \rho (\partial K / \partial z) + C_1 \sin 2\varphi / r] dr = 0, \quad (6) \end{aligned}$$

где $C_1 = S \sin \rho + K \cos \rho$, $C_2 = S \cos \rho - K \sin \rho$, знак «+» относится к семейству характеристик $dr = \operatorname{tg}(\varphi + \mu) dz$, а «-» – к семейству характеристик $dr = \operatorname{tg}(\varphi - \mu) dz$.

Система уравнений (5) и (6) описывает в дифференциальной форме условия равновесия бесконечно малого элемента пластической среды, образованного сеткой линий скольжения, которая является естественной координатной сеткой, совпадающей с направлениями сдвиговых деформаций в материале, что дает наглядное представление о течении материала в очагах деформации.

При расчетах любых технологических процессов формирования рассматриваемого класса материалов обязательным является соблюдение условия, вытекающего из наличия излома на функции пластичности этих материалов (см. рис. 2), отделяющего условия деформаций с разрыхлением (разрушением) от условий деформации с уплотнением или с перестройкой структуры материала, не сопровождающейся ростом дефектов. Откуда следует, что в процессе формирования нормальные к поверхностям сдвига в материале напряжения должны быть больше, чем величина σ_n^* в точке излома функции пластичности.

Совокупность краевых задач и построенных для расчета полей напряжений линий характеристик по всему формообразующему тракту оснастки, имеющей локальное уменьшение площади сечения канала, реализованное в таком простом конструктивном решении, как плоская диафрагма, приведена на рис. 3, а. Как следует из рис. 3, а, на начальных границах OA (O^*A^*) расчета полей напряжений в зонах I, II и III решения задач Коши [4] в областях OAB (зона I) и $O^*A^*B^*$ (зона III) от области OAB^{**} (зона II) отличаются направлением вектора максимального сжимающего напряжения, который в зонах I и III на

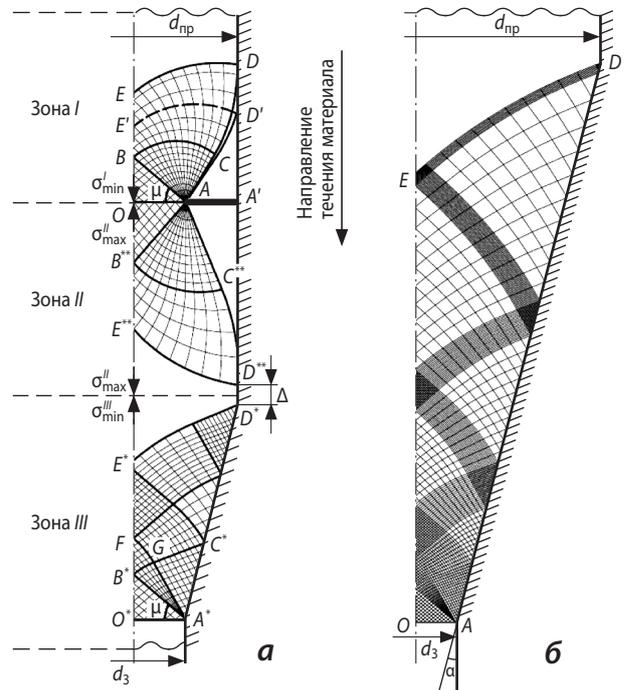


Рис. 3. Краевые задачи расчета полей напряжений в материале, выдавливаемом через деформирующую оснастку шнекового пресса

а – оснастка с диафрагмой
б – стандартная оснастка (без диафрагмы)

границах OA и O^*A^* направлен ортогонально к оси симметрии деформационного канала, а в зоне II на границе OA параллелен этой оси. Отметим, что на оси симметрии, а соответственно, и на границах OA (O^*A^*) нормальные напряжения, направленные параллельно оси z и ортогонально к ней, являются главными, поэтому рассчитать их величину можно из соотношений

$$\sigma_r, \sigma_j = S(1 \pm \sin \rho) \pm K \cos \rho. \quad (7)$$

Поскольку при перетекании материала из одной зоны в другую нормальные напряжения, направленные вдоль направления движения потока материала, равны (условие неразрывности деформации), то на границе перехода между I-й и II-й зонами деформации материала σ_{\min} зоны I равно σ_{\max} зоны II, что, согласно уравнению (7), приводит к соотношению

$$S_I(1 - \sin \rho) - K \cos \rho = S_{II}(1 + \sin \rho) + K \cos \rho. \quad (8)$$

Этот тип соотношения между S_I и S_{II} выполняется также и на границе между зонами II и III. На этом переходе S_{III} соотносится с S_{II} так же, как и S_I с S_{II} в уравнении (8).

В области ABC ($AB^{**}C^{**}$) на линии скольжения AB (AB^{**}) решается задача Гурса (вырожденный случай задачи Римана), а угол разворота характеристики AB

(AB^{**}) зависит от соотношения диаметров пресса ($d_{пр}$) и отверстия в диафрагме (d_d) (см. рис. 1, б), а также от условий трения материала по цилиндрической поверхности той части оснастки, в которую встроена диафрагма. Линии ACD ($AC^{**}D^{**}$) являются границами застойной зоны материала, заключенной между ними, торцевой поверхностью диафрагмы (линия AA) и цилиндрической поверхностью оснастки (AD и AD^{**}). Трение материала по поверхности застойной зоны равно пределу его сдвиговой прочности (трение налипания). Если трение материала по поверхности (AD и AD^{**}) также равно предельному трению, то поверхность сдвига в материале в точках D и D^{**} , как показано на рис. 3, а, будет направлена по касательной к поверхности оснастки.

Если трение по поверхности оснастки меньше трения налипания, то размер застойной зоны в материале уменьшается и величина параметра S на границе $E'D'$ (см. рис. 3, а) может снизиться на 15–25 %.

В зоне III решение задачи Гурса дополняется решением двух смешанных краевых задач: на характеристике B^*G и оси OE^* , а также на характеристике A^*G и поверхности «запирающего» конуса (A^*D^*). Угол наклона характеристики A^*G к границе A^*C^* определяется углом граничного трения $\varphi_{тр}$, которое на этой поверхности, в отличие от трения на оси симметрии, не равно нулю. Затем на характеристиках FG и GC^* решается задача Римана. Остальное поле до точки D^* застраивается по этой схеме переходами от задачи Римана к смешанным задачам и наоборот.

Слой материала между линиями скольжения E^*D^* и $E^{**}D^{**}$ пластически не деформируется и является жесткой зоной, разница между главными напряжениями в материале которой меньше его предельных прочностных характеристик. Необходимая для формирования полноценных очагов деформации толщина этого слоя материала, разделяющего очаги деформации зон II и III, может быть оценочно определена из условий его прочности на изгиб. Расчет может быть проведен по аналогии с расчетом плоских крышек в аппаратах, работающих под давлением, по формуле $\delta = cd_k(p/\sigma_T)^{1/2}$, где δ – толщина слоя; d_k – диаметр канала; p – разница между напряжениями, параллельными оси канала на ограничивающих этот слой поверхностях материала; σ_T – предел текучести материала, сжатого давлением, равным напряжениям σ_z на поверхности E^*D^* ; $c \approx 0,4 \div 0,5$.

Для расчета полей напряжений в представленных на рис. 3, а краевых задачах необходима информация о параметрах функции пластичности материала K и ρ и значениях коэффициента трения (угла трения $\varphi_{тр}$) материала о поверхность оснастки.

Поскольку в производственных условиях возможности их определения ограничены, то для получения с достаточной для практики точностью оценки значений этих величин доступными для производства средствами, без использования специального исследовательского оборудования, математическая модель рассматриваемого варианта процесса экструзии была дополнена расчетной схемой, представленной на рис. 3, б, которая описывает течение материала по гладким коническим каналам оснастки.

Отметим, что экспериментальное определение параметра ρ не является обязательным, так как предельное сжатие материал получает уже на входе в очаг деформации и дальнейшее приращение плотности при уменьшении напряжений сжатия реализуется только за счет получаемых им деформаций. Как правило, это приращение плотности не превышает 5–10 %, что не сопровождается значительными изменениями параметра ρ функции пластичности формуемого материала в очаге деформации. В диапазоне значений относительных плотностей, близких к предельному уплотнению материала, величина угла внутреннего трения ρ для разных материалов изменяется не более чем на 0,1–0,2 рад. В инженерных расчетах, к которым относится и рассматриваемая здесь математическая модель процесса экструзии, вполне допустимо принимать значение угла ρ равным 0,15–0,20 рад.

Для определения параметров K и $\varphi_{тр}$ предлагается методика, основанная на сопоставлении расчетов, проведенных для разных длин каналов и разных степеней вытяжки материала в широком диапазоне возможных условий трения по схеме, представленной на рис. 3, б, с данными о давлениях вытяжки реального материала на двух или трех вариантах оснастки, в каждой из которых сняты калибрующие цилиндры. Это позволяет принять, что на выходе из формующей части оснастки сопротивление выдавливаю материалу равно нулю.

Для этих схем вытяжки, подставляя в формулу (7) $\sigma_{\min} = \sigma_j = 0$, на начальной границе сета OA (см. рис. 3, б) (выход материала из конуса) получим

$$S = K \cos \rho / (1 - \sin \rho). \quad (9)$$

При заданном фиксированном значении ρ , как следует из уравнения (9), S является линейной функцией от K . Поэтому, согласно соотношениям (5) и (6), умножение условно принятой величины K на любой множитель приведет, без изменения поля линий характеристик, к росту всех значений S по всему очагу деформации.

Ниже в качестве примера приводится расчет давлений прессования материала на входе в оснастку

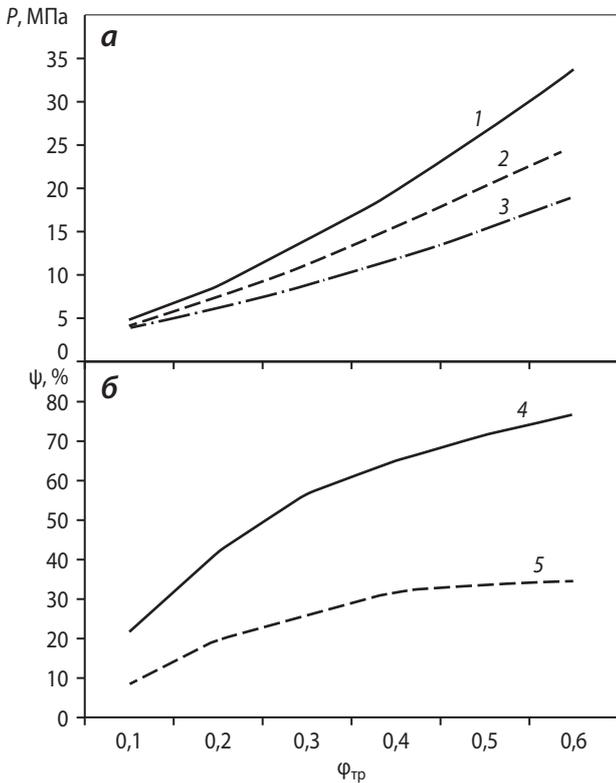


Рис. 4. Зависимость давления выдавливания материала от угла трения ($\varphi_{тр}$) материала по поверхности инструмента
а – давление выдавливания материала из каналов разной длины (l_k) при степени вытяжки 4: $l_k = 3d_{пр}$ (1); $2,5d_{пр}$ (2) и $2d_{пр}$ (3)
б – относительное увеличение давления выдавливания $\psi = (P - P_3)/P_3$, где P_3 – давление выдавливания при $l_k = 2d_{пр}$, а P соответствует $l_k = 3d_{пр}$ (4) и $l_k = 2,5d_{пр}$ (5)

при $K = 1$ МПа (условная величина). Графики результатов расчетов величин давлений вытяжки заготовки с условным диаметром 250 мм на прессе диаметром 500 мм для разных условий трения приведены на рис. 4, а.

Для реальных величин параметра K_m – искомого коэффициента сцепления реального материала – значения давлений прессования на графиках увеличатся в K_m раз, но вид графиков на рис. 4, а не изменится. На рис. 4, б представлены графики не зависящих от значений K изменений относительных приращений давлений прессования $\Psi = (P - P_3)/P_3$ (безразмерная величина) для разных длин формирующей оснастки и разных фиксированных величин углов трения $\varphi_{тр}$.

Для нахождения реального для данных типов оснастки угла трения $\varphi_{тр}$ достаточно сопоставить параметр Ψ для полученных в эксперименте приращений давлений прессования с графиками рис. 4, б. При большем количестве данных, полученных в экспериментах и расчетах, величина ошибки при определении $\varphi_{тр}$ уменьшается.

При известном $\varphi_{тр}$ значение параметра K_m материала получают, умножая $K = 1$ МПа на отношение измеренных в эксперименте величин давлений вытяжки к величине этих давлений, приведенных на рис. 4 и рассчитанных при $K = 1$ МПа.

Имея оценки K и угла трения $\varphi_{тр}$, можно с приемлемой точностью оценить и давление подпора, которое создает калибрующий цилиндр на выходе материала из формирующей оснастки. Для этого достаточно сопоставить давление вытяжки материала, измеренное на оснастках, неуконплектованных и уконплектованных калибрующим цилиндром, с давлениями вытяжки (давлениями на входе материала в калибрующий цилиндр), рассчитанными для различных величин параметра S при уже известных величинах K_m и $\varphi_{тр}$. Величина создаваемого калибрующим цилиндром противодействия находится по формуле (7) по разнице между величинами S , рассчитанными для оснасток с калибрующим цилиндром и без него. По аналогичной схеме можно вычислить величину противодавлений и для других конфигураций оснастки и использовать эти данные для выбора оптимальных длин калибрующих цилиндров.

По углу трения $\varphi_{тр}$ может быть рассчитан и некоторый усредненный коэффициент трения материала по поверхности оснастки, под которым принято понимать отношение нормального к поверхности оснастки напряжения в материале ($\sigma_{тр}$) и касательного напряжения ($\tau_{тр}$) в материале у этой поверхности, т. е. $f_{тр} = \tau_{тр}/\sigma_{тр}$. Расчет этих напряжений проводится по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_{тр} &= S(1 + \sin\varphi \cos 2\varphi_{тр}) + K \cos\varphi \cos 2\varphi_{тр}, \\ \tau_{тр} &= \sin 2\varphi_{тр}(S \sin\varphi + K \cos\varphi), \end{aligned} \quad (10)$$

в которых $\varphi_{тр}$ – угол между поверхностью оснастки и максимальным сжимающим напряжением (σ_{max}) в материале у этой поверхности.

При больших значениях $\varphi_{тр}$ на входе материала в формирующую коническую оснастку формируются застойные зоны. Предельному трению (трению налипания) соответствует $\varphi_{тр} = \pi/2 - \mu$.

Для компьютерного просчета значений S и φ (4–5 тыс. точек) одного варианта всей модели (геометрия канала, трение, прочностные характеристики материала) достаточно нескольких минут, что открывает широкие возможности, варьируя различными факторами (форма поверхности рабочего канала, отношение между диаметрами пресса и отверстия в диафрагме, а также между $d_{пр}$ и габаритами конечного продукта), подбирать их оптимальное для поставленных задач сочетание.

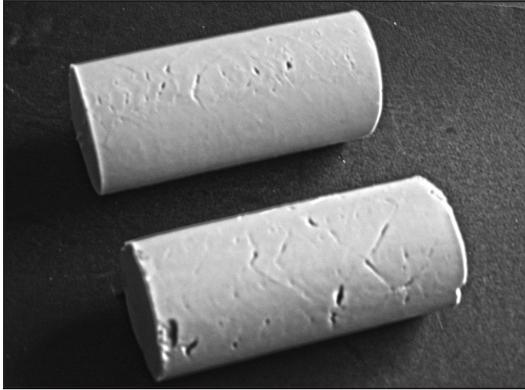


Рис. 5. Дефекты на поверхности заготовок, вытянутых через оснастку с диафрагмой

Все варианты расчетов начинаются с решения краевых задач в зоне II (см. рис. 3, а), так как в точке D^{**} у материала наименее благоприятные условия деформации, поскольку в области, прилегающей к этой точке, параметр S имеет минимальные для зон, прилегающих к диафрагме, значения. Допустимую величину напряжений, нормальных к поверхностям сдвига в материале, расположенном в непосредственной близости к точке D^{**} , определяют, как выше отмечалось, исходя из значений σ_n^* (см. рис. 2), отделяю-

щих условия деформации с разрыхлением от условий деформации с уплотнением. По значениям φ , K и ρ в точке D^{**} по соотношению $\sigma_{\max} \sin \varphi \geq \sigma_n^*$ рассчитывается требуемая для выполнения этого условия величина σ_{\max} и по уравнению (7) при известном σ_{\max} (σ_i) вычисляется соответствующая ему величина параметра S .

Как показано на рис. 5, невыполнение этого условия ведет к развитию дефектов (линии Людерса–Чернова) на поверхности вытянутых заготовок.

Для получения заданного уровня значений S в зоне точки D^{**} , рассчитывая поле напряжений в зоне II, подбирают значения S на границе OA . Затем из условия равенства нормальных к этой границе напряжений в зонах I и II из уравнения (8) определяют значения S на границе OA в зоне I. Аналогичная схема подбора граничных значений S на границе OA^* в зоне III ведется из условия равенства параллельных оси вытяжки нормальных напряжений σ_z в области перетекания материала из зоны II в зону III. Решение всей совокупности краевых задач по длине деформирующего канала дает полную информацию о напряжениях в материале (3–5 тыс. точек).

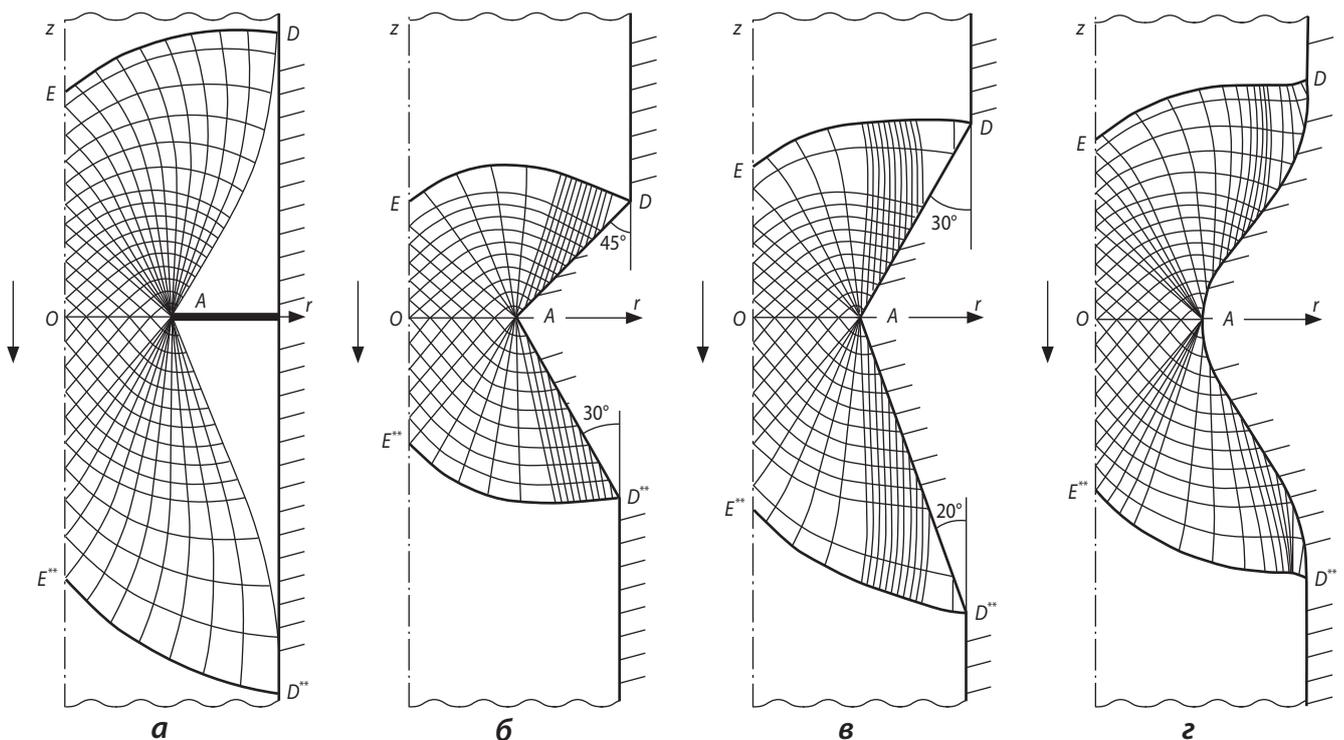


Рис. 6. Сетки линий скольжения в очагах деформации на входе и выходе из зоны локального уменьшения площади сечения деформационного канала
а – плоская диафрагма; **б, в** – конические переходные поверхности; **г** – криволинейная переходная поверхность

На рис. 6 представлены сетки линий скольжения в очагах деформаций в зоне локального уменьшения площади сечения рабочего канала формирующей оснастки для разных вариантов геометрии поверхностей перехода к минимальному диаметру отверстия в этой зоне: ступенчатый переход к плоской диафрагме с отверстием (рис. 6, а) и переход через поверхности, образованные прямолинейными (рис. 6, б и в) и криволинейными (рис. 6, г) образующими. Как показали расчеты, такие поверхности уменьшают градиенты скоростей течения материала в зоне максимального уменьшения площади сечения рабочего канала, а также дают возможность управлять интенсивностью приращения силовых параметров в этих очагах деформации материала.

В табл. 1 и 2 представлены данные, которые для разных условий трения и вариантов сочетаний углов наклона образующих конических поверхностей к продольной оси канала показывают, во сколько раз изменяются значения параметра S от начальной границы сечения OA (см. рис. 6, б и в) к границам очагов деформации.

В табл. 3 отражено, как при использовании плоских диафрагм изменяются приращения значений

параметра S с увеличением степени вытяжки материала. Такого рода информация дает возможность выбора оптимальной конфигурации деформационного канала при заданных ограничениях на его форму и величину давлений выдавливания материала, развиваемых прессом.

Из результатов расчетов, приведенных в табл. 1–3, также следует, что использование в качестве элемента, обеспечивающего локальное уменьшение площади сечения деформационного канала, плоской плиты с отверстиями не является наилучшим решением и наряду со снижением качества продукции существенно ограничивает возможности прессового оборудования. Наилучший результат, как показали расчеты, дают криволинейные поверхности перехода, форма очага деформации для которых приведена на рис. 6, г. Так, при угле трения $\varphi_{тр} = 0,4$ отношение параметра S в точке D на входе в очаг деформации к значениям S на границе OA составляет $S_D/S_{OA} = 1,68$, а $S_{OA}/S_{D^{**}} = 2,03$. При этом наилучший вариант для конических переходных поверхностей при этом же трении (угол наклона образующей конуса к оси z на входе материала в отверстие диафрагмы $45\text{--}60^\circ$, а на выходе 30°) дает значения этих отношений 1,91 и 2,35 соответственно. Следует отметить достаточное преимущество конических переходных поверхностей перед плоскими диафрагмами, у которых эти отношения равны 2,37 и 6,67.

Таблица 1. Отношения значений параметра S в точке D к его значениям на границе OA (см. рис. 6, а–в) при степени вытяжки 4

Угол трения, рад	Угол наклона образующей конуса к оси z				Плоская диафрагма
	20°	30°	45°	60°	
0,4	2,23	1,96	1,91	1,92	2,37
0,5	2,29	2,09	2,00	2,00	
0,6	2,49	2,22	2,10	2,08	

Таблица 2. Отношения значений параметра S на границе OA к его значениям в точке D^{**} (см. рис. 6, а–в) при степени вытяжки 4

Угол трения, рад	Угол наклона образующей конуса к оси z			Плоская диафрагма
	20°	30°	45°	
0,4	3,51	2,35	3,45	6,67
0,5	4,76	2,67	4,17	
0,6	5,88	3,13	5,26	

Таблица 3. Отношения значений параметра S в точках D и D^{**} к его значениям на границе OA (см. рис. 6, а) при $\varphi_{тр} = 0,4$

Плоская диафрагма	Степень вытяжки		
	4,00	5,17	6,25
Вход (т. D)	2,37	2,57	2,67
Выход (т. D^{**})	6,67	9,63	16,39

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Математические модели процесса вытяжки на шнековых прессах стержневых заготовок из пластифицированных шихт порошковых и композиционных материалов, базирующиеся на расчетах полей напряжений в различных очагах деформации материала, открывают широкие возможности как для анализа характера течения материала через формообразующие оснастки прессов, так и для подбора их оптимальной конфигурации и выбора оптимальной формы рабочих поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Августиник А. Н. Керамика. М.: Стройиздат, 1957.
2. Анциферов В. Н., Перельман В. Е. Механика процессов пресования порошковых и композиционных материалов. М.: Изд. дом «Грааль», 2001.
3. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Гостехтеориздат, 1959.
4. Курант Р. Уравнения с частными производными. М.: Мир, 1964.