

УДК 621.762

ОПЫТ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ ФОРМУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ВЫТЯЖКИ СТЕРЖНЕВЫХ ЗАГОТОВОК НА ШНЕКОВЫХ ПРЕССАХ

Предложены варианты использования математической модели процесса вытяжки керамических материалов для компьютерного проектирования формообразующих оснасток с диафрагмами для шнековых прессов. Разработана методика определения параметров функции пластичности прессуемых материалов и коэффициентов трения материала о поверхности оснастки с использованием промышленного оборудования. Проанализированы условия течения материалов через различные типы оснасток, образующие рабочих поверхностей которых являются прямыми. Показано, как, изменяя форму поверхности канала, степень вытяжки материала в зоне локального уменьшения сечения канала и площадь сечения заготовок, подбирать для процесса вытяжки их оптимальное сочетание.

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

В процессах экструзии решаются задачи формирования заготовок требуемых габарита и формы, частичного или полного залечивания крупных и мелких дефектов структуры материала и создания текстур, вытянутых вдоль оси изделия, поскольку такие текстуры имеют наилучшие показатели прочности в элементах конструкций, работающих на растяжение (сжатие) и на изгиб.

Применение в качестве экструдера такого высокопроизводительного оборудования, как шнековые прессы (рис. 1, а), значительно усложняет задачу получения высококачественной однородной структуры материала по всему сечению вытянутых заготовок. Материал в шнековом тракте прессы перемещается по винтовой поверхности вращающегося шнека как гайка, поэтому он входит в формующий канал оснастки в виде толсто-стенной «трубы» (рис. 2, а), центральная полость которой заполняется материалом по мере его продавливания через сходящийся канал оснастки за счет осевого (осадка) и радиального сжатия такого «двухслойного» цилиндрического агрегата. Залечивание дефектной зоны материала в центральной полости заготовок всегда было и остается актуальной задачей для всех производств, использующих шнековое оборудование. Это естественно вытекает из того факта, что такие виды брака в изделиях, как S-образные трещины, сви-ли, поперечные трещины и др. (рис. 2, б, в), к которым приводят градиенты усадок в операциях термического передела заготовок, являются пря-

мым следствием градиента структурных и текстурных характеристик материала в вытянутых заготовках.

Для хорошего уплотнения рыхлой центральной зоны материала, диаметр которой задается диаметром «тела» шнека (0,38–0,43 от диаметра

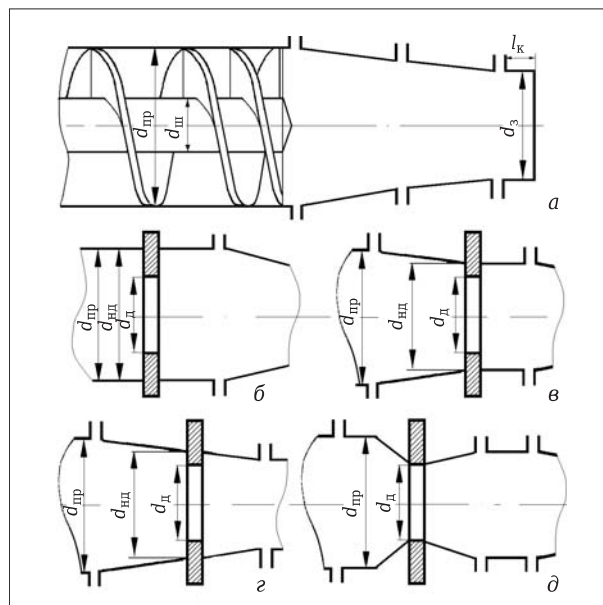


Рис. 1. Схема формообразующих оснасток шнековых прессов: а — конический мундштук; б — мундштук с диафрагмой; в — конический мундштук с диафрагмой и цилиндром; г — диафрагма в коническом канале мундштука; д — конические переходные поверхности к отверстию диафрагмы

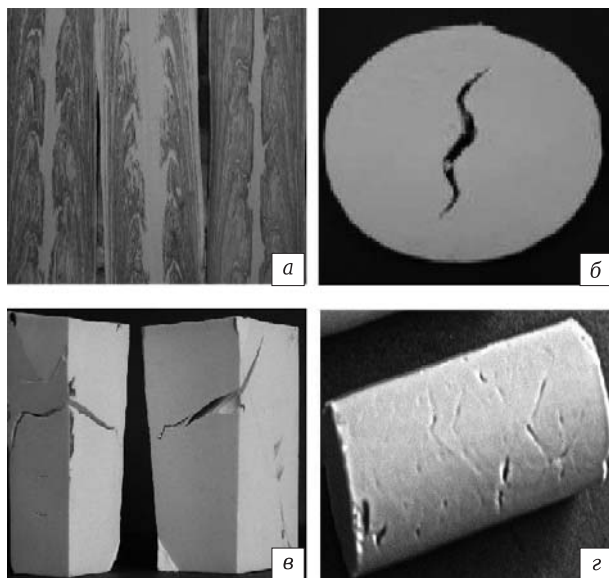


Рис. 2. Характерные дефекты в заготовках, вытянутых на шнековых прессах: *а* — продольное сечение отформованной заготовки; *б, в* — трещины в поперечных и продольных сечениях заготовок после обжига; *г* — трещины на поверхности обожженной заготовки

пресса), необходимо при формировании заготовок из высокопластичных материалов, как показывает практика, обеспечить степень вытяжки материала (отношение площади сечения пресса к площади сечения заготовки) 4,5–5,0. Но качественное формирование заготовок из непластичных масс возможно только при степенях вытяжки 7 и более. Это существенно ограничивает габариты (размеры площади сечения) формуемых на прессах стержневых заготовок и требует при таких степенях вытяжки значительных давлений прессования.

Производство, как правило, заинтересовано в сокращении линейки имеющегося оборудования и в его эффективном использовании за счет расширения выпускаемой на каждом прессе номенклатуры изделий. Последнее включает в себя возможность увеличивать габариты заготовок, формуемых на имеющемся оборудовании, что, конечно, нельзя реализовать без приемов, позволяющих без значимого уменьшения качества заготовок уменьшать степень вытяжки материала. С этой целью используются различные дополнительные технологические приемы, позволяющие с большим или меньшим успехом решать эту проблему. Одним из таких приемов, широко применяемых в технологии вытяжки крупногабаритных заготовок, является включение в формообразующую оснастку пресса элемента, именуемого диафрагмой [1].

На рис. 1, *б* показана схема установки в оснастку такого устройства, самая простая конфигурация которого представляет собой плоскую пли-

ту с отверстием, через которое продавливается формуемый материал. При этом отношение диаметров пресса $d_{пр}$ и отверстия в диафрагме d_d задает получаемую материалом заготовки степень дополнительной радиальной и окружной деформации.

В настоящей статье демонстрируются возможности, которые представляет компьютерное проектирование сложных оснасток, имеющих локальные уменьшения площади сечения. Для компьютерного проектирования и выбора геометрии формирующих поверхностей оснастки была разработана математическая модель процесса течения пластифицированных масс через каналы с диафрагмами. Для расчета полей напряжений в деформируемом материале используется хорошо развитый математический аппарат теории пластичности дискретных сред, у которых на границах составляющих их структурных элементов прочностные свойства терпят разрывы.

Функции пластичности таких материалов хорошо описываются критерием Кулона [2]

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

где τ_n — касательные напряжения на площадке с нормалью 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:

$$\begin{aligned} \partial S / \partial z (\cos 2\varphi + \sin \rho) + \partial S / \partial r \sin 2\varphi + \\ + \partial \varphi / \partial r \cdot 2(S \sin \rho + K \cos \rho) + \partial \rho / \partial z (S \cos \rho - K \sin \rho) + \\ + \partial K / \partial z \cos \rho + \sin 2\varphi / r (S \sin \rho + K \cos \rho) &= 0; \end{aligned}$$

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

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

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 (вдоль линий скольжения) имеют вид

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

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

Система уравнений (5) и (6) описывает в дифференциальной форме условия равновесия бесконечно малого элемента пластичной 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 формования рассматриваемого класса материалов обязательно соблюдение условия, вытекающего из наличия излома на функции пластичности материалов рассматриваемого класса, отделяющего условия деформаций с разрыхлением (разрушением) от условий деформации с уплотнением или с перестройкой структуры материала, не сопровождающейся ростом дефектов. Из этого следует, что в процессах формования напряжения, нормальные к поверхностям сдвига в материале, 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, представлена на рис. 3, а. На начальных границах OA (O^*A^*) расчета полей напряжений в зонах I–III решения задач Коши [4] в областях OAB (зона I) и $O^*B^*A^*$ (зона III) от области OAB^{**} (зона II) отличаются направлением вектора максимального сжимающего напряжения, который в зонах I и III на границах OA и O^*A^* направлен ортогонально к оси симметрии деформационного канала, а в зоне II на границе OA параллельно этой

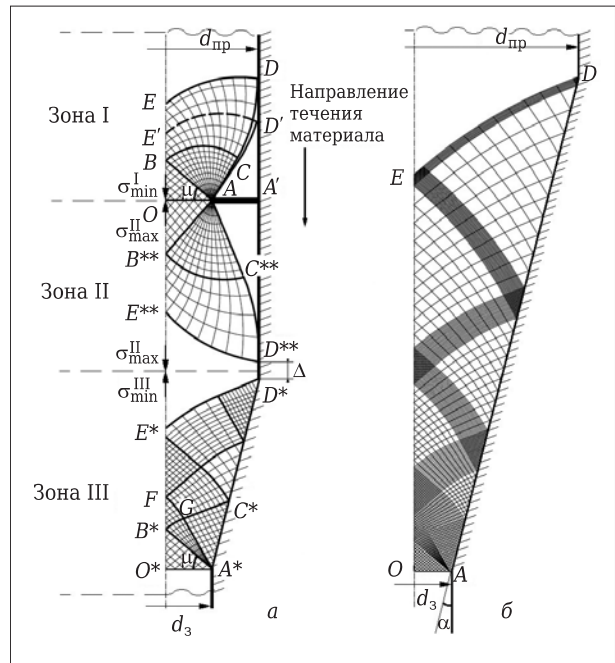


Рис. 3. Краевые задачи расчета полей напряжений в материале, выдавливаемом через деформирующую оснастку шнекового пресса: а — оснастка с диафрагмой; б — стандартная оснастка (без диафрагмы)

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

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

Поскольку при перетекании материала из одной зоны в другую нормальные напряжения, направленные вдоль направления движения потока материала, равны и ортогональны к границе перехода между I и II зоной деформации материала, то соотношение между $\sigma_{\min}$ зоны I равно $\sigma_{\max}$ зоны II, что согласно уравнению (7) приводит к равенству

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

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 к S_{II} в уравнении (8).

В области ABC (AB^*C^{**}) на линии скольжения AB (AB^{**}) решается задача Гурса (вырожденный случай задачи Римана), 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 цилиндри-

ческой поверхностью оснастки ($A'D$ и $A'D^{**}$). Трение материала по поверхности застойной зоны равно пределу его сдвиговой прочности (трение налипания). Если трение материала по поверхности ($A'D$ и $A'D^{**}$) 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 этой поверхности меньше трения налипания, то размер застойной зоны в материале уменьшается и величина параметра S на границе $E'D'$ (см. рис. 3, а) может уменьшиться 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, задаваемая соотношением (2), которой меньше предельных прочностных характеристик материала. Необходимая для формирования полноценных очагов деформации материала толщина δ 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

$$\delta = CD(P/\sigma_T)^{1/2},$$

где D — 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 $E^{**}D^{**}$; $C \approx 0,4 \div 0,5$.

Самая неэффективная компоновка оснастки представлена на рис. 1, г. Отсутствие зазора между очагами деформации зон II и III или недостаточная длина цилиндрической части оснастки (см. рис. 3, а), в которой формируется очаг деформации зоны II, т.е. сближение или совмещение точек D^* и A' (установка запирающего конуса непосредственно на диафрагму), приводит к перекрытию очагов деформации зон II и III. Это вызывает

негативные последствия по следующим причинам.

Вдоль границ зон II и III по линиям характеристик $E^{**}D^{**}$ и E^*D^* при наличии «жесткой» зоны $E^{**}D^{**}D^*E^*$ (см. рис. 3, а) приращения параметра S имеют противоположные знаки и S достигает максимальных для зоны II значений в точке E^{**} (ось симметрии), а в зоне III — в точке D^* (периферийная зона у поверхности оснастки).

При отсутствии «жесткой» зоны $E^{**}D^{**}D^*E^*$ такое естественное для очагов деформации и их границ распределение S , а соответственно, и σ_z не может быть реализовано, что практически полностью разрушает очаг деформации в зоне II и частично в зоне III. Уменьшение от центра к периферии перепада значений σ_r в зоне II и противоположное по знаку приращение σ_r в зоне III в области их перекрытия препятствует в зоне II выдавливанию материала из центральной области и заполнению им периферийных зон у поверхности инструмента. Это ограничивает степень вытяжки материала в зоне III.

Кроме того, перекрытие очагов деформации зон II и III приводит к разрушению упорядоченной текстуры, сформированной при продавливании материала через отверстие диафрагмы, и качество восстановления ее в частично разрушенном очаге деформации зоны III не может быть высоким.

При перетекании материала из зоны II в зону III сопутствующее перекрытию очагов деформации зон II и III недостаточное противодействие потоку материала в зоне, прилегающей к оси симметрии, изменяет также распределение напряжений в области перехода материала из зоны I в зону II. Последнее оказывает существенное влияние на распределение напряжений и деформаций в зоне I, увеличивая градиенты деформаций и напряжений в материале и уменьшая его деформационную обработку в наиболее дефектной центральной области зоны I.

Для расчета полей напряжений в краевых задачах, представленных на рис. 3, а, необходима информация о параметрах функции пластичности материала K и ρ и о значениях коэффициента трения (угла трения $\varphi_{тр}$) материала о поверхность оснастки. Поскольку в производственных условиях возможности определения значений этих величин ограничены, то для получения оценки значений этих величин с достаточной для практики точностью и 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 материала происходит 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 плотностей, близких к предельному уплотнению материала, угол внутреннего трения ρ для разных материалов изменяется не более чем на 0,1–0,2 рад. В инженерных расчетах, к которым относится и предлагаемая здесь математическая модель процесса экструзии, вполне допустимо принимать оценочное 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 выдавливанию материала равно нулю.

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

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

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 увеличению всех значений S по всему очагу деформации.

Ниже в качестве примера приводится расчет давлений прессования материала на входе в оснастку при $K = 1$ МПа (условная величина). Результаты расчетов величин давлений вытяжки для разных условий трения при вытяжке заготовки с условным диаметром 250 мм на прессе диаметром 500 мм представлены на рис. 4, а. Можно использовать также схему вытяжки заготовок различного диаметра, т. е. с разной степенью вытяжки при постоянной длине оснастки. Как

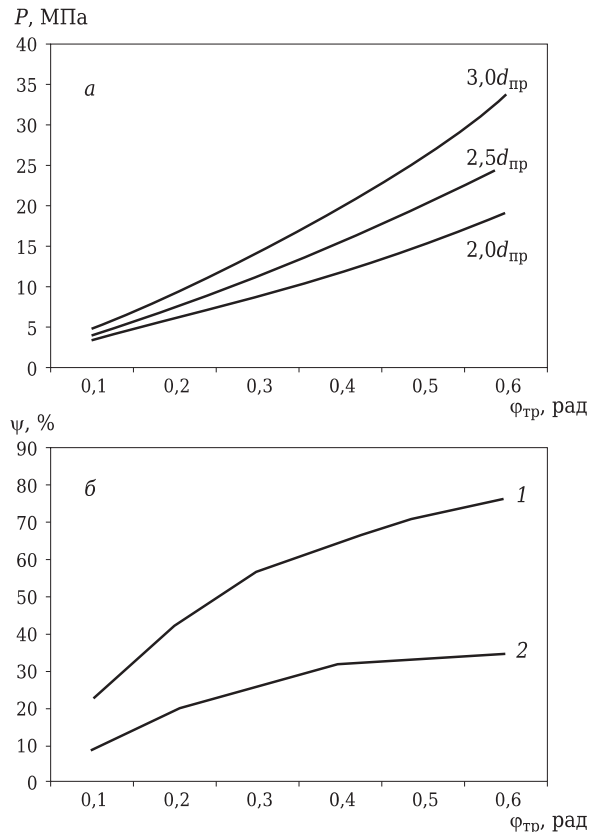


Рис. 4. Зависимость давления выдавливания материала P от угла трения $\varphi_{тр}$ материала по поверхности инструмента: а — давление выдавливания материала из каналов разной длины l_k (указаны на кривых) при степени вытяжки 4; б — относительное увеличение давления выдавливания $(P - P_3)/P_3$ (где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

показывают оценочные расчеты, при увеличении степени вытяжки от 1,25 до 6,25 давления прессования для $\varphi_{тр} = 0$ возрастают в 1,5 раза, для $\varphi_{тр} = 0,1$ рад в 1,58 раза, для $\varphi_{тр} = 0,2$ рад в 1,66 раза, для $\varphi_{тр} = 0,3$ рад в 1,74 раза.

Для реальных величин искомого коэффициента сцепления реального материала K_m , 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 $\psi = (P - P_0)/P_0$ (безразмерная величина) для разных длин формующей оснастки и для разных фиксированных величин $\varphi_{тр}$.

Для определения реального для данных типов оснастки $\varphi_{тр}$ достаточно сопоставить параметр ψ для полученных в эксперименте приращений давлений прессования с графиками рис. 4, б. Увеличение количества данных, полученных в экспериментах и расчетах, уменьшает величину ошибки при определении $\varphi_{тр}$ или $f_{тр}$.

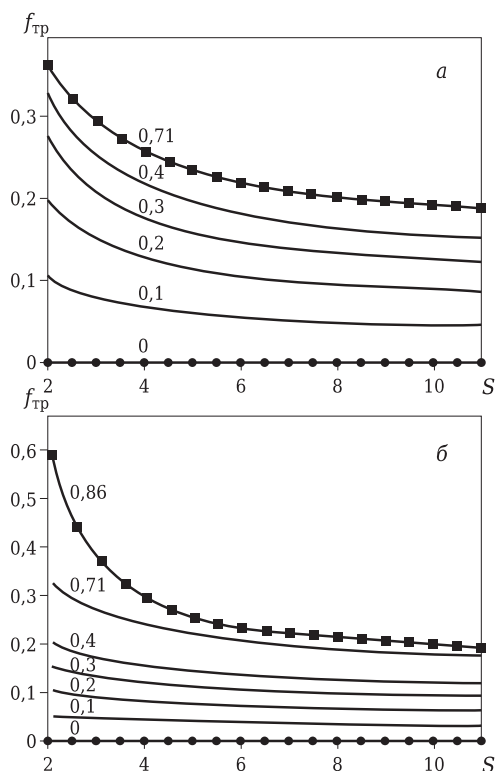


Рис. 5. Зависимость между $\varphi_{тр}$ (указан на кривых, рад) и $f_{тр}$ от величины параметра S : а — зоны I и III; б — зона II

При известном $\varphi_{тр}$ параметр 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 $\varphi_{тр}$, можно с приемлемой точностью оценить и давление подпора, которое создает калибрующий цилиндр на выходе материала из формующей оснастки. Для этого достаточно сопоставить давление вытяжки материала, измеренное на оснастках, не укомплектованных и укомплектованных калибрующим цилиндром, с давлениями вытяжки (давления на входе материала в калибрующий цилиндр), рассчитанными для различных величин параметра S при уже известных величинах K_m и $\varphi_{тр}$. Создаваемый калибрующим цилиндром противодействие рассчитывается с помощью формулы (7) по разнице между величинами S , рассчитанными для оснасток с калибрующим цилиндром и без него. По аналогичной схеме можно вычислить противодействие для других конфигураций оснастки и использовать эти данные для выбора оптимальных длин калибрующих цилиндров.

Как показано на рис. 5, по углу трения $\varphi_{тр}$ может быть рассчитан и некоторый усредненный коэффициент трения $f_{тр}$ материала по поверхности оснастки, а также при известном S может быть сделан обратный пересчет по $f_{тр}$ значений $\varphi_{тр}$ по всей поверхности инструмента. Под коэффициен-

том трения принято понимать отношение нормального $\sigma_{гр}$ и касательного $\tau_{гр}$ к поверхности оснастки напряжений в материале у этой поверхности, т. е. $f_{тр} = \tau_{гр}/\sigma_{гр}$. Расчет этих напряжений в материале у поверхности оснастки проводится по формулам

$$\sigma_{гр} = S(1 + \sin\varphi \cdot \cos 2\varphi_{тр}) + K \cos\varphi \cdot \cos 2\varphi_{тр},$$

$$\tau_{гр} = \sin 2\varphi_{тр}(S \cdot \sin\varphi + K \cos\varphi), \quad (10)$$

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 формующую коническую оснастку образуются 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 позволяет, варьируя различными факторами (формой поверхности рабочего канала, отношением между диаметром прессы и диаметром отверстия в диафрагме, а также габаритами конечного продукта), подбирать их оптимальное для поставленных задач сочетание.

Контрольные значения давлений прессования, допустимых для данного типоразмера прессы, могут быть получены без их измерения. Для этого достаточно решить задачу течения одного из используемых на производстве материалов (K , ρ и $f_{тр}$ известны) через гладкий канал для степени вытяжки 6–6,45 на стандартных конических мундштуках (см. рис. 3, б). Поскольку, как правило, оборудование рассчитано на нагрузки, соответствующие таким степеням вытяжки, то зафиксированные в результате проведенных расчетов значения давлений прессования могут быть введены в качестве контрольного параметра в математическую модель расчета процесса течения экструдированных материалов через формообразующую оснастку с диафрагмой. Так как увеличение габаритов заготовки снижает степень вытяжки и, соответственно, уменьшает давление ее прессования, то это позволяет вводить в оснастку элементы, хотя и создающие дополнительное сопротивление течению материала, но обеспечивающие при этом его дополнительную деформационную обработку.

Все варианты расчетов начинаются с решения краевых задач в зоне II (см. рис. 3, а), так как у материала в области, прилегающей к точке D^{**} , наименее благоприятные условия деформации (параметр S имеет минимальные для областей, прилегающих к диафрагме, значения). Допустимую величину напряжений, нормальных к поверх-

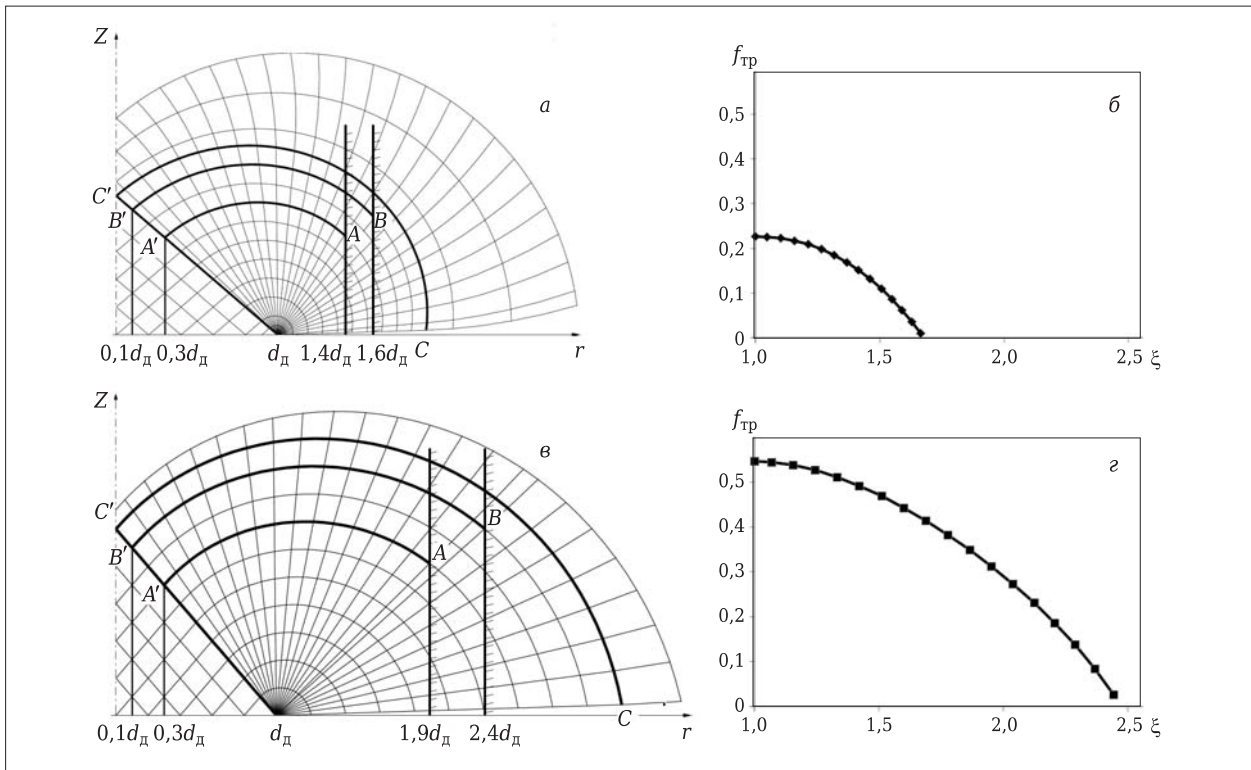


Рис. 6. Схема формирования дефектных зон в материале, продавливаемом через диафрагму: а, в — сетки линий скольжения в материале на входе (а) и на выходе (в) из диафрагмы; б, з — границы сочетаний $f_{тр} = \Phi(\xi)$, определяющие условия формирования дефектных зон в материале

ностям сдвига в материале, расположенном в непосредственной близости к точке D^{**} , определяют, как выше отмечалось, исходя из значений σ_n^* , отделяющих условия деформации с разрыхлением от условий деформации с уплотнением. По значениям ϕ , K и ρ в точке D^{**} по соотношению $\sigma_{\max} \cdot \sin \mu \geq \sigma_n^*$ рассчитывается требуемая для выполнения этого условия величина $\sigma_{\max}$ и по уравнению (7) при известном $\sigma_{\max}$ (σ_i) вычисляется соответствующая ему величина параметра S . Как показано на рис. 2, з, невыполнение этого условия ведет к развитию дефектов (линии Людерса — Чернова) на поверхности вытянутых заготовок.

Для получения заданного уровня значений S в зоне точки D^{**} проводят несколько раз расчеты поля напряжений в зоне II и подбирают значения S на границе OA . Затем из условия равенства нормальных к границе OA 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 O^*A^* 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 в нескольких тысячах

точек полную информацию о напряжениях в материале.

Первая и основная проблема, которую решают технолог и конструктор оснастки, это выбор диаметра отверстия в диафрагме d_d . На этот выбор влияют соотношение диаметров пресса и заготовки, давление продавливания материала через оснастку и другие факторы. Решение задачи затрудняется отсутствием описания механизма и условий течения материала, при которых глубина деформационной обработки материала не достигает центральных зон отформованных заготовок.

Математическая модель процесса экструзии материалов через формообразующие оснастки с диафрагмами позволяет провести полный анализ течения материала в таких каналах и с высокой точностью оценить влияние различных факторов на этот процесс, т. е. ликвидировать имеющиеся пробелы в информации о формировании дефектных зон в заготовках. В частности, для различных условий трения ($f_{тр}$) и различных соотношений между диаметрами пресса $d_{пр}$ и диаметром отверстия в диафрагме d_d ($\xi = d_{пр}/d_d$) были определены условия (линии DD' на рис. 6, б, з), приводящие к развитию дефектных центральных зон в заготовках. Механизм формирования таких зон в заготовках представлен на рис. 6, а, в. Если поверхности (линии) скольжения в материале пересекают ра-

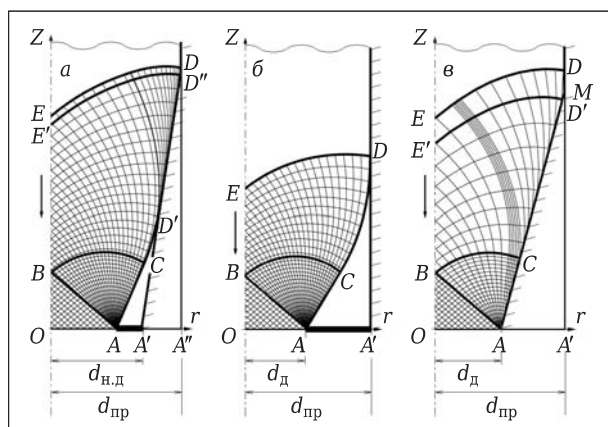


Рис. 7. Сетки линий скольжения в очагах деформации в материале на входе в диафрагму: а — оснастка с переходной поверхностью в виде усеченного конуса; б — оснастка со ступенчатым переходом от цилиндра к диафрагме; в — оснастка с коническим переходом от цилиндра к отверстию в диафрагме

бочую поверхность оснастки под углом $\varphi_{тр}$, соответствующим паре трения материал — поверхность, внутри зоны (точки А, В), ограниченной характеристикой CC' , выходящей из вершины зоны задачи Коши (см. рис. 3, а), то формирование дефектных зон в центре заготовки неизбежно. Характер зависимости радиусов дефектных зон r от расположения точек А ($f_{тр} = 0,06$; $r = 0,3d_{д}$) и В ($f_{тр} = 0$; $r = 0,1d_{д}$) показан на рис. 6, а, в.

Используемые в некоторых оснастках усеченные конусы на входе в диафрагму (см. рис. 1, в и рис. 7, а) уменьшают параметр ξ (уменьшают наружный диаметр диафрагмы $d_{н.д}$), что хотя и может инициировать формирование дефектных зон в заготовках (см. рис. 6), но и увеличивает высоту (объем) очага деформации до величины, равной сумме длины этого конуса и высоты застойной

зоны в области перехода конуса в цилиндр прессы. Эта конфигурация оснастки позволяет начать деформационную обработку материала в зонах, прилегающих к оси симметрии канала, на более ранней стадии процесса и увеличить ее в полтора раза, но, как показали расчеты, при трении налипания этот вариант оснастки повышает давление прессования в 1,3–1,4 раза. Отметим, что такое трение ($\varphi_{тр} = 0,71$ рад), как следует из рис. 5, практически всегда имеет место в зоне выдавливания материала из прессы в оснастку (зона высоких давлений) уже при $f_{тр} \geq 0,2$. Отметим, что использование в качестве поверхностей перехода, соединяющих отверстие в диафрагме с цилиндром прессы, длинных конусов (рис. 7, в) при сопоставимых условиях трения дает еще более отрицательные результаты: давление прессования может возрастать в 2 раза, хотя в таком варианте оснастки застойные зоны $AA'D'$ и $AA'D$ (см. рис. 7, а, б) отсутствуют (см. рис. 7, в).

На рис. 8 представлены сетки линий характеристик (линий скольжения) для такой конструкции деформационного канала оснастки, в которой поверхность перехода от цилиндрических поверхностей тракта к отверстию в диафрагме включает в себя дополнительный конический элемент, что позволяет уменьшить градиенты скоростей течения материала в очагах деформации, прилегающих к диафрагме, и дает возможность управлять интенсивностью приращения силовых параметров в очагах деформации материала на входе и выходе его из отверстия диафрагмы, а также позволяет снять ограничения с соотношения $\xi = d_{пр}/d_{д}$, нарушение которых, как показано на рис. 6, блокирует деформационную обработку материала в центральных областях заготовки.

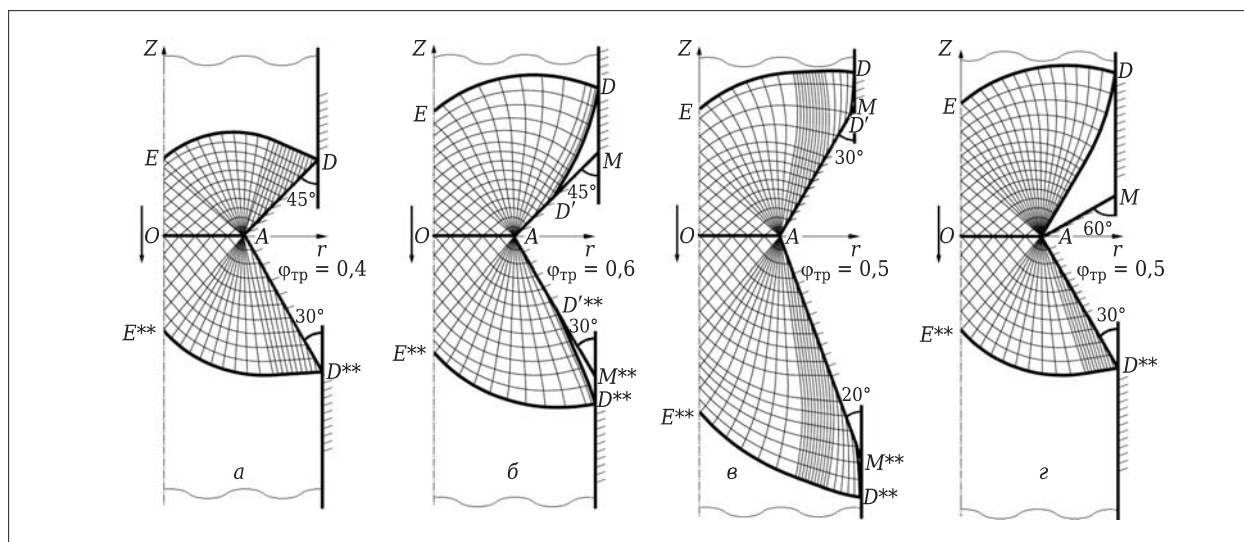


Рис. 8. Сетки линий скольжения (а–г) в очагах деформации в зонах входа и выхода материала из отверстия диафрагмы при различных углах трения

На рис. 8, а, б показано, как изменение угла граничного трения при сопоставимых углах наклона образующих конусов отражается на форме очага деформации и, соответственно, на приращениях средних напряжений по очагам деформации. Рис. 8, в, г, как и рис. 8, а, б, дают представление при $\varphi_{\text{тр}} = \text{const}$ об изменениях формы и размеров очагов деформации для различных сочетаний углов наклона конических поверхностей перехода на входе и выходе материала из отверстия диафрагмы.

На рис. 8, б, г видны застойные зоны DMD' (рис. 8, б) и AMD (рис. 8, г), образующиеся в углах пересечения конических переходных поверхностей с цилиндрическими.

Расчеты полей напряжений в краевых задачах, представленных на рис. 8, показывают, что при малых и средних углах трения $\varphi_{\text{тр}} = 0,4$ рад (см. рис. 8, а) конические переходные поверхности по сравнению с конструкциями со ступенчатыми переходами от цилиндра пресса к диафрагме уменьшают перепад напряжений S в материале, продавливаемом через отверстие в диафрагме, в 2,5–3,0 раза. С увеличением трения (см. рис. 8, б) разница в условиях течения материала для этих двух вариантов конструкций нивелируется и не превышает 10–15 %.

Из расчета разных вариантов конических переходных поверхностей следует, что для $\varphi_{\text{тр}} = 0,5$ рад (см. рис. 8, в, г) конфигурация с углами наклона образующих поверхностей к оси вытяжки 30 и 20° по сравнению с вариантом 60 и 30°

дает выигрыш в 5 %, но оба варианта конструкций эффективней, чем ступенчатые переходы в оснастках, на 40–50 %. Все расчеты проводились для модельного материала, у которого $K = 0,4$ МПа, $\rho = 0,15$ рад.

Отсюда следует, что использование в качестве диафрагмы плоских плит с отверстиями не является наилучшим решением, так как наряду со снижением качества продукции существенно ограничивает возможности прессового оборудования.

Таким образом, математическая модель процесса экструзии материала через каналы, содержащие диафрагму, позволяет, варьируя многими параметрами (комплектация, трение, геометрия, соотношение размеров) находить оптимальные конфигурации оснастки, используемой на шнековых прессах.

Библиографический список

1. **Августиник, А. Н.** Керамика / А. Н. Августиник. — М. : Стройиздат, 1957. — 488 с.
2. **Анциферов, В. Н.** Механика процессов прессования порошковых и композиционных материалов / В. Н. Анциферов, В. Е. Перельман. — М. : Издательский дом Грааль, 2001. — 628 с.
3. **Соколовский, В. В.** Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский — М. : Госиздат технико-теоретической литературы, 1959. — 276 с.
4. **Курант, Р.** Уравнения с частными производными / Р. Курант. — М. : Мир, 1964. — 830 с. ■

Получено 29.11.12
© Г. В. Перельман, 2013 г.

К. т. н. **М. И. Тимохова**

Москва

УДК 666.3.022.2

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ФАКТОРОВ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ

Проведенные работы показали, что основными факторами устойчивости мелющих тел к истиранию являются способ и параметры их формирования — квазиизостатическое прессование, состав керамического материала, тонина его помола, а также режим обжига, обеспечивающий создание мелкокристаллической структуры обожженных изделий. Разработан одностадийный способ квазиизостатического прессования мелющих тел.

Ключевые слова: квазиизостатическое прессование, эластичный пресс-буфер, мелющие шары, устойчивость к истиранию, алундовый материал, глина, серийный завод, мембранный штамп, одностадийное прессование.

Разработанный нами способ квазиизостатического прессования керамических и огнеупорных изделий является самым перспективным и экономичным из всех известных в настоящее время

способов прессования [1]. Способ обеспечивает объемное трехосевое прессование изделий и безотходную технологию производства изделий из любых прессуемых порошковых материалов