Extrusion Process Analysis

(Russian Engineer View)

Boris Nudelman

2/28/2017

Aluminum profiles extrusion applied theory. The mechanical essentials. Engineering process analysis. Russian version

In Memory of my Father

Prof. Leizer Nudelman

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ.

(Russian Engineer View)

1. Введение.

Предметом настоящего анализа являются некоторые аспекты процесса горячей экструзии алюминиевых профилей. Во избежание неопределенности, рассматривается процесс прямой экструзии (direct extrusion), выполняемый на гидравлическом прессе по следующим схеме и элементам цикла.

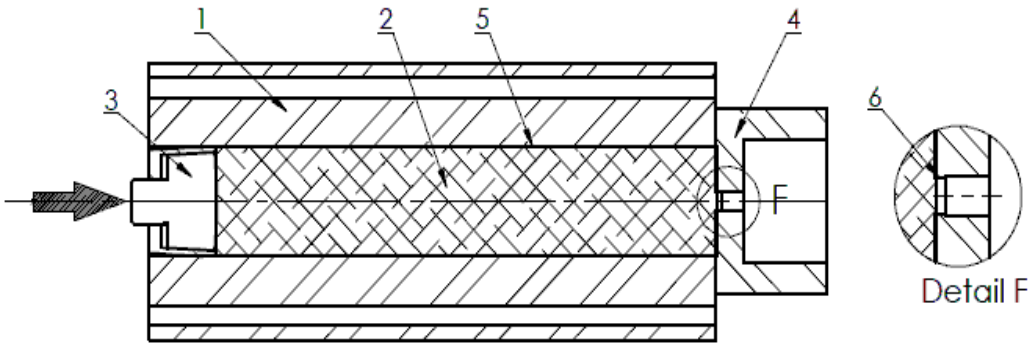


Рис. 1. Схема процесса: 1 – контейнер, 2 – заготовка (billet), 3 – пресс блок (dummy block), 4 – матрица (die), 5 – контактная поверхность гильзы контейнера (liner), 6 – рабочий поясок матрицы (bearing).

Состояние и положение элементов конструкции следующее: Контейнер 1 герметично прижат к матрице 4; заготовка 2 в полости контейнера после циклов выпуска воздуха (Burp cycles); объем контейнера заполнен; выполняется набор давления под действием замедленного движения пресс блока (начало рабочего хода).

Поводом для настоящей работы послужила необходимость обоснования некоторых усовершенствований процесса экструзии алюминиевых профилей. По мере работы было выявлено весьма противоречивое, на взгляд автора, толкование в специальной литературе влияния трения на процесс течения металла в контейнере. Имеются ввиду теоретические выкладки, в частности, в работе [1], на которую ссылаются большинство других авторов [2], [3], [4]. С другой стороны, мнения и взгляды на проблему некоторых специалистов – практиков никоим образом не

согласуются с теоретическими результатами. Невозможность воспользоваться, даже частично, существующими методиками расчета вынудили автора воспроизвести анализ, начиная с исходных позиций. Этому выводу предшествовала довольно длительная работа, в начале которой взгляды автора на проблему не отличались от традиционных. В частности, в первом варианте анализа, где предметом был процесс экструзии поликристаллических оптических волокон, был использован традиционный подход. Как будто трение существует само по себе, вне причин, его создающих, и вне объектов, на которые оно воздействует. В результате не было выявлено сколько – нибудь продуктивных следствий: не только путей совершенствования процесса, но и причин ухудшения структуры изделий в процессе экструзии.
Также автор обязан отметить, что результаты настоящего анализа в целом опираются на опыт, накопленный специалистами в данной области, и хорошо себе представляет, какой огромный труд вложен для достижения современного уровня знаний. Особенно это относится к экспериментальным работам. Работы [5] и [6] во многом помогли выработать подход к решению задачи трения в контейнере с минимальным уровнем абстракции.

2. Трение по поверхности гильзы контейнера.

2.1 Напряженное состояние в объеме заготовки.

Повторим исходное состояние. Весь объем контейнера заполнен. Под действием усилия пресс блока идет набор давления до значения $\sigma_z \leq \sigma_e$, начала пластического течения (Рис. 2.1).

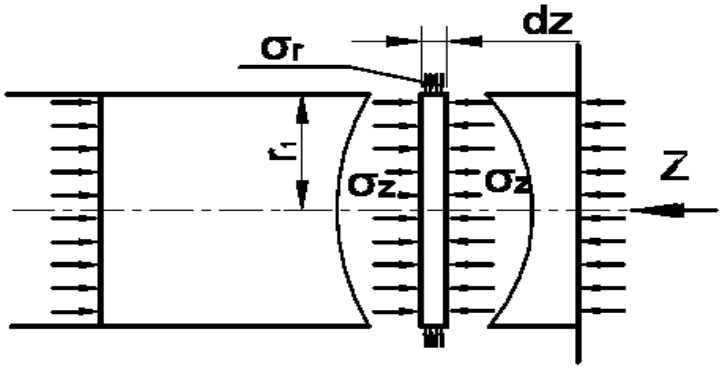


Рис. 2.1. Схема нагрузок, действующих на заготовку.

Рассмотрим напряженное состояние диска толщиной d_z на небольшом расстоянии от матрицы. При отсутствии значительных деформаций считаем справедливой гипотезу плоских сечений. Считаем также поле

осевых напряжений σ_z равномерно распределенным по торцу диска. Напряжения от трения по внешней цилиндрической поверхности или отсутствуют или малы при отсутствии осевого смещения. Для анализа рассмотрим элемент объема диска в произвольной точке торца (Рис. 2.2).

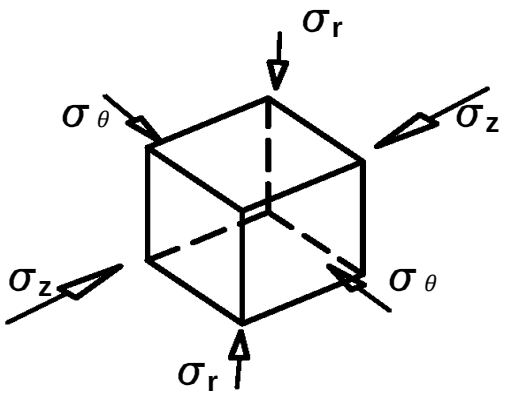


Рис. 2.2 Элемент объема. Компоненты напряжений до начала течения.

Грани элемента ориентированы в соответствии с направлениями главных напряжений: $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$ – где σ_z – осевое напряжение; σ_r – радиальное напряжение; σ_θ – условно примем как окружное напряжение. Поскольку σ_z является активным и по условиям осевой симметрии главным напряжением сжатия - $\sigma_z = \sigma_3$, то σ_r и σ_θ также являются главными компонентами напряженного состояния. В наших условиях всестороннего сжатия мы не можем механически, без специальной проверки, воспользоваться соотношениями обобщенного закона упругости:

В главных напряжениях	В нашей схеме
$\varepsilon_1 = \frac{1}{E}(\sigma_1 - \mu\sigma_2 - \mu\sigma_3)$	$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \mu\sigma_r - \mu\sigma_\theta)$
$\varepsilon_2 = \frac{1}{E}(\sigma_2 - \mu\sigma_1 - \mu\sigma_3)$	$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \mu\sigma_z - \mu\sigma_\theta)$ (2.1)
$\varepsilon_3 = \frac{1}{E}(\sigma_3 - \mu\sigma_1 - \mu\sigma_2)$	$\varepsilon_Q = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \mu\sigma_z - \mu\sigma_r)$

Взаимозависимости (2.1) предполагают произвольные значения составляющих. Выражение для деформаций не соответствует условию совместности: деформация от действия $\sigma_z = \sigma_3$ в направлениях σ_2 и σ_1 предполагает или деформацию противоположного знака у смежных элементов объема, или их смещения, что невозможно при трехстороннем сжатии.

В условиях дискового элемента смежные элементарные объемы находятся в одинаковых условиях. Иначе говоря, в любом малом дифференциальном участке объема можно принять поле напряжений однородным. Более того,мы можем принять, что радиальные перемещения внутренней поверхности гильзы контейнера отсутствуют. (В действительности, радиальная деформация гильзы существует, но мала, так как жесткость конструкции – посадки гильзы в корпусе контейнера в десятки раз превышает жесткость нагретой заготовки.) Поэтому, для зон заготовки, удаленных от поверхности, справедливо предположить отсутствие радиальных перемещений – $u_r = 0$; и окружных, $u_\theta = 0$ – в силу осевой симметрии. Единственно возможным вариантом напряженно – деформированного состояния остается однородное поле:

$$\varepsilon_z = f(\sigma_z) \;\; ; \quad \varepsilon_r = \varepsilon_\theta = 0; \qquad \sigma_r = \sigma_\theta = f(\sigma_z) \qquad (2.2)$$

Не имея опытных данных для определения соотношений компонентов напряженно – деформированного состояния при трехстороннем сжатии, воспользуемся способом последовательного действия (принцип независимости действия сил), по возможности без искажения физических условий. Итак, имеем справедливый до определенного уровня напряжений закон упругости для линейного напряженного состояния:

$$\sigma_z = E\varepsilon_z; \qquad \varepsilon'_\theta = \varepsilon'_r = -\mu\sigma_z, \qquad (2.3)$$

где E и μ константы или функции связи напряжений и деформаций в диапазоне действующих напряжений;

$\varepsilon'_\theta = \varepsilon'_r$ - виртуальные возможные компоненты деформаций от действия

σ_z в направлениях r и θ.

Поскольку ε_z в условиях сжатия отрицательна то $\varepsilon'_\theta = \varepsilon'_r > 0$.

В частности, полная виртуальная деформация ε_θ состоит из трех составляющих: от влияния σ_z - $\varepsilon'_\theta = -\mu\frac{\sigma_z}{E}$;

от влияния σ_θ - $\varepsilon''_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E}$;

от влияния σ_r - $\varepsilon'''_\theta = -\mu\frac{\sigma_r}{E}$.

Уравнение для определения σ_θ с учетом (2.2):

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E} - \mu\frac{\sigma_z}{E} - \mu\frac{\sigma_r}{E} = 0 \quad (2.4)$$

Откуда: $$\boldsymbol{\sigma_\theta = \sigma_r = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_z} \quad \textbf{(2.5)}$$

Результирующая реальная линейная деформация с учетом сопротивления в объемной схеме:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \mu\left(\frac{\sigma_\theta}{E} + \frac{\sigma_r}{E}\right) = \frac{\left(1 - 2\frac{\mu^2}{1-\mu}\right)\sigma_z}{E} \quad (2.6).$$

Выражение (2.5) является базовым для нашего анализа и определяет соотношение напряжений сжатия в главных направлениях в условиях равновесия для любого дифференциального участка поля напряжений. Отметим, что (2.5) может быть напрямую получено из системы (2.1) подстановкой принятых нами условий. Принимая соотношение (2.5) в качестве базового для анализа, что все еще является гипотезой, необходимо пояснить, что все другие соотношения с нашими ограничениями невозможны. Например,

$\sigma_2 \neq \sigma_1$ и $|\sigma_1| < \left|\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_3\right|$, где σ_3 – наибольшее по абсолютной величине отрицательное активное напряжение. Это виртуальное состояние означает, что в направлении σ_1 в обе стороны (по обеим граням) элемент неуравновешен и деформация продолжится до уравновешивания. Второй случай, $\sigma_2 \neq \sigma_1$ и $|\sigma_2| > \left|\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_3\right|$. (2.7)

Мы определили σ_3 – как наибольшее активное напряжение сжатия, а значит и главное. Превышение в любом из оставшихся двух направлений (2.7) означает, что кроме реакции от σ_3 в этом направлении существует источник активного напряжения. В таком случае направление σ_3 не является главным. Главным в таком случае будет: $$\overrightarrow{\sigma_g} = \overrightarrow{\sigma_3} + \overrightarrow{\left[\sigma_2 - \left(\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_3\right)\right]} \text{ и } \sigma_g = -\sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_2^2}.$$

В оставшихся двух направлениях, при отсутствии течения, реакции выровняются до соотношения (2.5).

Входящие в (2.5) параметры: E – модуль сопротивления деформации и μ - коэффициент отношения компонентов напряжений – полностью определяют поведение материала. Их изменение, наряду с другими факторами, в зависимости от уровня напряжений должно определяться экспериментально.

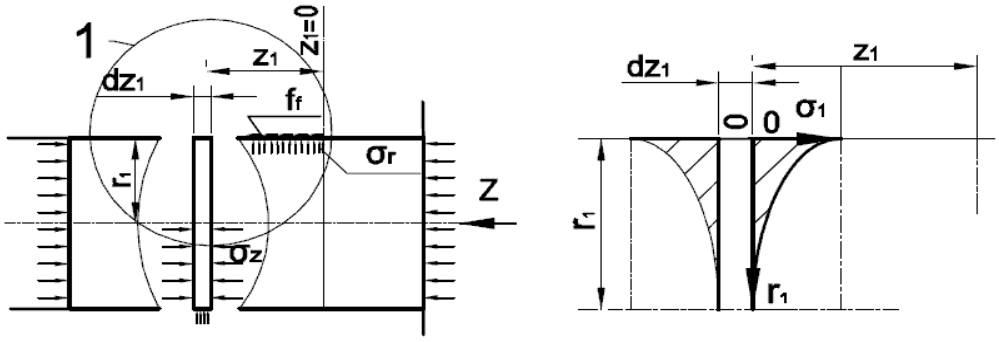
2.2 Модель действия сил трения.

Интегральная схема нагрузок, действующих на заготовку, включает в себя (Рис. 2.1):

1) активную нагрузку от пресс блока, распределенную по торцу, действующую вдоль оси;
2) реакцию от матрицы, в обратном направлении, распределенную по второму торцу;
3) радиальную реакцию от цилиндрической поверхности гильзы контейнера;
4) силы трения, обусловленные радиальным давлением и осевым смещением, действующие параллельно оси (не обозначены на схеме рис. 2.1).

Повторимся с начальными условиями, принятыми для анализа: объем контейнера заполнен; заготовка нагружена до напряжения начала течения σ_e , которое действует в зоне до некоторого расстояния по z от матрицы. Поскольку по периферии этого участка нет перемещений, то и силы трения по поверхности контакта с контейнером отсутствуют. Вернее представить, что успевает произойти их релаксация после нагружения. Для определенности рассматриваем равновесие диска шириной dz_1 (Рис. 2.3, a) на расстоянии от матрицы. Считаем, что нулевое положение по z_1 диска соответствует границе зоны начала осевого смещения и, следовательно, возникновению сил трения. Следующим шагом в настоящем анализе будет определение воздействия на заготовку сил трения по цилиндрической поверхности гильзы контейнера. При этом обычный подход,когда в расчет принимают давление начала пластичности, которое без изменения действует и в радиальном направлении, в нашем случае представляется по крайней мере нелогичным. Из (2.5) имеем в радиальном направлении:

$$\sigma_r(z_1 = 0) = \frac{\mu}{1-\mu}\,\sigma_{z1}(0) = \frac{\mu}{1-\mu}\,\sigma_e \quad . \qquad (2.8)$$



a b

Рис. 2.3. a – схема распределения сил трения; b – схема распределения напряжений реакции в объеме заготовки.

Принимаем закон трения в форме Кулона – сила трения на единицу поверхности пропорциональна нормальному давлению. (Так же как и в [6]):

$$f_f = k\sigma_r \ , \qquad (2.9)$$

Где k принят пока постоянным из известного диапазона изменения [6]: 0.6…1.0, где значение 1.0 соответствует условиям прилипания (sticking friction). Таким образом, из (2.8) начальное значение силы трения на единицу поверхности:

$$f_f(z_1 = 0) = k\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_e \qquad (2.10)$$

В произвольном сечении по z_1 из области действия сил трения на такой же элемент будет действовать элементарная сила трения:

$$f_f(z_1) = k\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_{z1}(z_1) \qquad (2.11)$$

В известных автору работах не приводится анализ реакции заготовки на силы трения, действующие по поверхности. Более того, объявляется, что напряжения трения превышают предельные напряжения среза и, поэтому, происходит деформация сдвига в слоях на каком-то расстоянии от поверхности.

Правильнее основываться на общем свойстве поликристаллических материалов, и алюминиевых сплавов в том числе, противодействовать внешним нагрузкам.

Действующая по поверхности сила трения в каждом сечении вызывает в заготовке реакцию, равную по величине и противоположную по направлению - N_z. При "поверхностном" представлении положим для примера, что реакция распределена по объему в слое 10 молекул или 10 кристаллитов по 1μm каждый. Это определенно противоречит условию сплошности заготовки или изотропности, так как требует скачка свойств по границе действия реакции. А также по схеме распределения не соответствует принципу минимума работы деформации:

$w = \frac{\sigma_{z1}\varepsilon_{z1}}{2}$ – работа; $\varepsilon_{z1} = \frac{\sigma_{z1}}{E}$ - деформация;

$\sigma_{z1} = \frac{N_z}{0.01cm1cm}$ – напряжение.

В реальном представлении функция распределения напряжений в радиальном направлении от поверхности контакта σ_{z1} должна соответствовать следующим характеристикам (Рис.2.3 b):

1) функция непрерывная;
2) ограниченная - $|\sigma_{z1}| \leq |\sigma_m|$; $r \leq r_1$;
3) касательная к осям σ_{z1} и r : $\frac{d\sigma_{z1}(0)}{dr} = -\infty$; при r=0, $\frac{dr(\sigma_1)}{d\sigma_{z1}} = 0$;

при $r_1 = r_{max}$, $\frac{d\sigma_{z1}(r_1)}{dr} = 0$;

4) вогнутая $\frac{d\sigma_{z1}(r_1)}{dr_1} \leq 0$; $\frac{d^2\sigma_{z1}(r_1)}{{dr_1}^2} \leq 0$.

Для вариаций принят тип функции – эллипс, отвечающий всем принятым характеристикам: каноническая форма - $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$;

отвечающая схеме (Рис.2.3 b) форма - $\frac{(\sigma_1 - \sigma_{z1})^2}{c} + \frac{(r_1 - r)^2}{f} = 1$. (2.12)

Из (2.12): $(\sigma_1 - \sigma_{z1})^2 = \frac{cf}{f} - \frac{c}{f}(r_1 - r)^2 = \frac{c}{f}[f - (r_1 - r)^2]$ (2.13)

В уравнении (2.13) имеем 4 неизвестных параметра для определения: c; f; σ_1; r_1 . Четыре условия для их определения:

1) при r = 0, $\sigma_{z1} = \sigma_1$; (2.14)

2) при $\sigma_{z1} = 0$, $r = r_1$; (2.15)

3) при всех вариациях параметров суммарная реакция в направлении z равна действующей в сечении силе трения:

$$\int_0^{r_1} \sigma_{z1}(r)dr = N_z, \quad \text{при z = 0, } N_z = N_{z0} \text{ ;} \qquad (2.16)$$

4) при всех вариациях параметра r_1 суммарная энергия деформации должна быть минимальной [7],

С учетом (2.6) энергия деформации:

$$W(r) = \int_0^{r_1} \frac{\sigma_{z1}\varepsilon_{z1}}{2} dr = \frac{(1-\mu-2\mu^2)}{E} \int_0^{r_1} [\sigma_{z1}(r)]^2 dr \ , \qquad (2.17)$$

$$\frac{dW(r)}{dr_1} = 0 \ .$$

Итак: 1) подставляем (2.14) в (2.13),

получаем - $f = (r_1 - r)^2 = r_1^2$, откуда - $r_1 = \sqrt{f}$;

2) подставляем (2.15) в (2.13),

получаем - $(\sigma_1 - \sigma_{z1})^2 = c$; откуда - $\sigma_1 = \sqrt{c}$;

3) В уравнении (2.13) заменяем c и f их выражениями через r_1 и σ_1:

$$(\sigma_1 - \sigma_{z1})^2 = {\sigma_1}^2 - \frac{{\sigma_1}^2}{r_1^2}(r_1 - r)^2 \ , \ \sigma_1 - \sigma_{z1} = \sqrt{{\sigma_1}^2 - \frac{{\sigma_1}^2}{r_1^2}(r_1 - r)^2} \ ,$$

$$\sigma_{z1} = \sigma_1 - \sigma_1\sqrt{1 - \frac{(r_1 - r)^2}{{r_1}^2}} \ , \quad \sigma_{z1} = \sigma_1\left[1 - \sqrt{1 - \frac{(r_1 - r)^2}{{r_1}^2}}\right] \qquad (2.18)$$

Остались возможные вариации двух параметров σ_1 и r_1.

Из (2.16) и (2.18) $\int_0^{r_1} \sigma_{z1}\,(r)dr = N_z(z)$,

$$N_z(z) = \ \sigma_1 \int_0^{r_1} dr - \frac{\sigma_1}{r_1}\int_0^{r_1} dr\,\sqrt{r_1^2 - r_1^2 - 2r_1 r - r^2} \ ,$$

$$N_z(z) = \sigma_1 r_1 - \frac{\sigma_1}{r_1}\int_0^{r_1}\sqrt{2r_1 r - r^2}\,dr\,. \qquad (2.19)$$

Выражение $\sigma_1 r_1$- есть площадь прямоугольника σ_1,0 и 0, r_1.

Естественно предположить, что второе слагаемое в (2.19) представляет собой четверть площади искомого эллипса: - 1/4$\pi\sigma_1 r_1$. Тогда

$$N_z(z) = \sigma_1 r_1\left(1 - \frac{\pi}{4}\right). \qquad (2.20)$$

Из [8] интеграл типа: a<0

$\int\sqrt{ax^2 + bx + c}\,dx = \frac{2ax+b}{4a}\sqrt{ax^2 + bx + c} + \frac{b^2 - 4ac}{8\sqrt{-a}}\,arcsin\left(\frac{2ax+b}{\sqrt{b^2 - 4ac}}\right)$; тогда второе слагаемое в (2.19):

$$\frac{\sigma_1}{r_1}\int_0^{r_1}\sqrt{2r_1 r - r^2}\,dx =$$

$$\frac{\sigma_1}{r_1}\left[\frac{(-2r + 2r_1)}{-4}\sqrt{-r^2 + 2r_1 r} + \frac{4r_1^2 + 0}{8}\,arcsin\frac{-2r + 2r_1}{\sqrt{4r_1^2 - 0}}\right]_0^{r_1} = \frac{\sigma_1}{r_1}\left(0 - \frac{r_1^2}{2}\frac{\pi}{2}\right),$$

тождественно (2.20).

Соотношения $\sigma_1 = \frac{N_z(z)}{r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right)}$; $r_1 = \frac{N_z(z)}{\sigma_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right)}$ (2.21)

позволяют исключить из (2.18) параметр σ_1:

$$\sigma_{z1} = \sigma_1\left[1 - \sqrt{1 - \frac{(r_1 - r)^2}{r_1^2}}\right] = \frac{N_z}{r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right)}\left[1 - \frac{1}{r_1}\sqrt{2r_1 r - r^2}\right] \qquad (2.22)$$

Из условия 4) энергия деформации с учетом (2.6) и (2.22):

$$W(r)=\int_0^{r_1}\left[\frac{\sigma_{z1}}{2}\frac{\sigma_{z1}(1-\mu-2\mu^2)}{(1-\mu)E}\right]dr=\int_0^{r_1}\frac{N_Z^2(1-\mu-2\mu^2)}{2E(1-\mu)\left(1-\frac{\pi}{4}\right)^2 r_1^2}\left(1-\frac{1}{r_1}\sqrt{2r_1r-r^2}\right)^2; \quad (2.23)$$

С точностью до постоянного множителя m энергия из (2.23):

$$W=m\int_0^{r_1}\left(1-\frac{1}{r_1}\sqrt{2r_1r-r^2}\right)^2dr=\frac{m}{r_1^2}\int_0^{r_1}\left(r_1-\sqrt{2r_1r-r^2}\right)^2dr=\frac{m}{r_1^2}\left[r_1^2r_1-2r_1\left(-\frac{r_1^2\pi}{4}\right)+r_1^3-\frac{1}{3}r_1^3\right]=mr_1\left(2+\frac{\pi}{2}-\frac{1}{3}\right);$$

подставляем значение множителя m:

$$W=\frac{{N_z}^2(1-\mu-2\mu^2)}{2E(1-\mu)\left(1-\frac{\pi}{4}\right)^2}\frac{\left(\frac{5}{3}-\frac{\pi}{2}\right)}{r_1} \quad . \quad (2.24)$$

Функция энергии обратно пропорциональна r_1 и минимальна при $r_1 = r_{1max}$. Максимальное значение r_1 равно радиусу гильзы контейнера.

Таким образом, функция распределения реакции от сил трения (2.22) и максимальное её значение при r = 0:

$$\sigma_1(z_1)=\frac{N_z}{r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right)}. \quad (2.25)$$

2.3 Распределение сил трения по оси z_1 заготовки.

Рассмотрим равновесие дифференциального диска из области действия сил трения (Рис. 2.4).

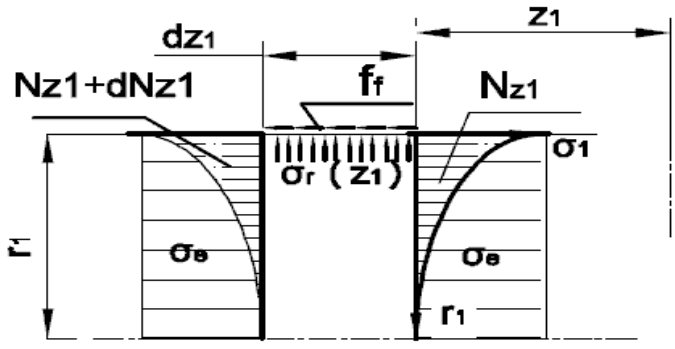


Рис. 2.4. Расчетная схема для определения функции сил трения вдоль оси заготовки.

Приращение силы трения на поверхности элемента, на длине dz, равно приращению реакции заготовки – dN_{z1}: $dN_{z1} = k\sigma_r dz_1$.

Из (2.5) $\sigma_r = (\sigma_e + \sigma_1)\frac{\mu}{1-\mu}$; из (2.25) $\sigma_1 = \frac{N_z}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}$; получаем уравнение для искомой функции распределения силы трения:

$$dN_z = \frac{\mu}{1-\mu} k \left[\sigma_e + \frac{N_z}{r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right)}\right] dz \ , \ \frac{dN_z}{dz} - k\frac{\mu}{1-\mu}\frac{N_z}{r_1(1-\frac{\pi}{4})} = k\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_e . \quad (2.26)$$

Обозначим $k_1 = k\frac{\mu}{1-\mu}$, тогда (2.26) примет вид:

$$\frac{dN_z}{dz} - k_1\frac{N_z}{r_1(1-\frac{\pi}{4})} = k_1\sigma_e \ . \quad (2.27)$$

Общее решение неоднородного уравнения (2.27) по [9]:

$$N = e^{-\int -\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}dz}\left[\int k_1\,\sigma_e e^{-\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z} dz + e^{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z} C\right] =$$

$$e^{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z}\int k_1\,\sigma_e e^{-\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z} dz + e^{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z} C = e^{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z} k_1\sigma_e \frac{e^{-\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z}}{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}} +$$

$$e^{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z} C = -\sigma_e r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right) + e^{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z} C \ .$$

Из начального условия: $z_1 = 0$; $N_z = 0$; $e^{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}0} = 1$; $C = \sigma_e r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right)$;

$$N_z = e^{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z}\sigma_e r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right) - \sigma_e r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right). \quad (2.28)$$

$$\frac{dN_z}{dz} = \frac{k_1}{r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right)} e^{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z}\sigma_e r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right); \quad (2.29)$$

При z = 0, $\frac{dN_z}{dz} = k_1\sigma_e = k\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_e$; - совпадает с (2.27).

2.4 Численная оценка.

Имея функцию распределения сил трения возможно произвести её предельную оценку с реальными величинами параметров процесса. В качестве примера воспользуемся данными [2] и [10]. Для сплава АК8 (аналоги – АА2014, АА2214): Модуль упругости $E = 0.74 * 10^5 MPa$; предел прочности - $\sigma_u = 365MPa$; коэффициент поперечной

деформации - $\mu = 0.33$. На уровне температуры 400°C: $E_t = 0.4E = 0.296 * 10^5 MPa$; $\sigma_{ut} \cong 0.18\sigma_u = 65.7MPa$. Из опыта принимаем напряжение начала течения $\sigma_e \cong 3\sigma_{ut} \cong 197.1MPa$. Радиус гильзы контейнера – r_1 = 3.5" = 8.9cm = 0.089m.

Для минимальной оценки коэффициент трения k=0.6 (В реальном процессе не наблюдался.). Радиальное давление на поверхности контакта с контейнером из (2.5): $\sigma_r = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_e = 0.493\sigma_e$; сила трения на единицу поверхности – на длине z_1 = 1cm: $f_f = N(1) = 0{,}01k\sigma_r = 0{,}01 * 0.6 * 0.493\sigma_e = 0.296\sigma_e 0.01$; приращение осевых напряжений на 1cm длины заготовки:

$\sigma_1(1) = \frac{N_z}{r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right)} = \frac{0.296\sigma_e * 0.01}{0.089 * 0.215} = 0.155\sigma_e$.

Для максимальной оценки коэффициент трения k_m = 1:
$N_m(1) = 0.493\sigma_e * 0.01$; $\sigma_{1max} = 0.258\sigma_e$.

Не имея реальных опытных данных, предположим, что суммарные максимальные осевые напряжения в два раза превышают напряжения начала течения: $\sigma_e + \sigma_1 = 2\sigma_e$, тогда из (2,25) и (2.28) определим расстояние, на котором действуют силы трения: $\sigma_e = \frac{N_z}{r_1\left(1-\frac{\pi}{4}\right)}$;

$N_z = \sigma_e r_1 0.215$; $e^{\frac{k_1}{r_1(1-\frac{\pi}{4})}z}\sigma_e r_1 0{,}215 - \sigma_e r_1 0{,}215 = \sigma_e r_1 0.215$; из последнего: $\frac{k_1 z}{r_1\ 0{,}215} = ln2$; подставляем значение k_1 = k*0.493;

$z = \frac{0.693 * 0.215 * r_1}{k * 0.493} = 0.302\frac{r_1}{k}$. (2.30)

При k = 0.6 , z' = 4.48cm; при k = 1, z'' = 2.7cm .

В реальном представлении полученные значения:

максимальные линейные напряжения – σ_{zmax} = $2\sigma_e$ = 394.2MPa;
суммарная сила трения на единицу длины периметра – N_z = 3.77MPa/m;
диаметр заготовки – d = 7" = 0.178m;
наибольшая длина заготовки – L_{max} = 0.9m .

Начало отсчета по оси z, принятое первоначально на неопределенном расстоянии от инструмента, теперь переносим на расстояния z' и z'' от пресс блока. Общее сопротивление от сил трения:
$F_f = 2\pi r_1 N_z = 2{,}11MN$.

Общее усилие пресса: $F_g = F_e + F_f = \pi r_1^2 \sigma_e + F_f = 4.65 + 2.11 = 6.76MN$.

Для принятых условий сила трения составляет $F_f / F_g = 0.31 – 31\%$. Таким образом, в результате получаем, что только небольшая часть заготовки по длине подвержена воздействию сил трения. Если согласиться, что силы трения возникают только при условии относительного движения по поверхности контакта, то имеем примыкающий к пресс блоку короткий участок (, движущийся со скоростью пресс блока) с повышенными по периферии напряжениями. Произвольно выбранный уровень $\sigma_1 = \sigma_e$ представляется достаточным для максимальной оценки. То-есть обеспечен потенциал напряжений, гарантирующий массоперенос в направлении градиента напряжений. Действительные значения σ_1, σ_{zmax}, z" – могут быть определены по результатам экспериментов.

До сих пор предполагался рост усилия пресса и напряжений в объеме заготовки до σ_e, напряжения начала экструзии, с замедленным ходом пресс блока. В реальном процессе 1...3mm/s. Считаем, что при таких скоростях не изменяется характер распределения напряжений в объеме заготовки, за исключением весьма малого участка контакта с периферией пресс блока.

Возвращаясь к традиционному представлению, течение металла должно происходить по каким-то слоям внутри заготовки в результате деформации среза. Если под срезом понимать относительное смещение слоев по какой-то поверхности раздела с полным разрушением связей, то таких условий в нашей модели не возникает. Исключения составляют:

1) участок, примыкающий к пресс блоку;
2) участок на входе в матрицу.

3. Зона контакта гильзы контейнера и пресс блока.

3.1. Напряженное состояние.

На элемент объема вблизи смежных поверхностей пресс блока и гильзы контейнера действуют напряжения (Рис.3.1):

осевые $\sigma_z = 2\sigma_e$, радиальные $\sigma_r = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_z$; с принятым значением $\mu = 0.33$, $\sigma_{rmax} = 0{,}493 * 2\sigma_e = 0.986\sigma_e$ (3.1)

Третье, окружное, направление в силу осевой симметрии во внимание не принимаем, так как $\varepsilon_\theta = 0; u_\theta = 0$ – формоизменение и перемещения в этом направлении отсутствуют.

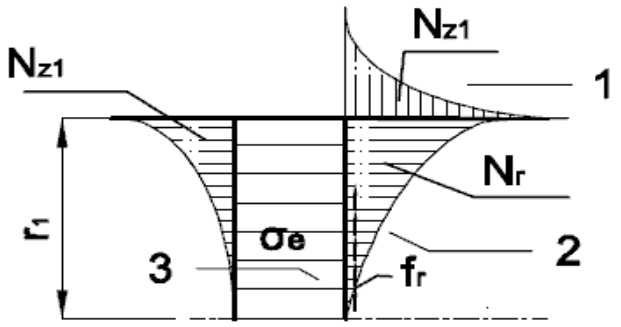


Рис. 3.1 Схема напряженного состояния в зоне контакта пресс блока и гильзы контейнера. 1 – гильза контейнера; 2 – тело заготовки; 3 – пресс блок.

Напряжения σ_{z1}, распределенные вдоль радиуса, являются нормальными к поверхности пресс блока. При движении материала вдоль этой поверхности (в радиальном направлении) они продуцируют напряжения трения, так же как и трение на поверхности гильзы контейнера. Максимальное напряжение трения из (3.1):

$$\sigma_{frmax} = k\sigma_{zmax} = k(\sigma_1 + \sigma_e) \ . \qquad (3.2)$$

Суммарная сила трения без учета эффекта накопления поверхностных сил: $N_r = k(N_z + \sigma_e r_1) \ .$ (3.3)
Оставим без учета также и геометрическое изменение поля напряжений, распределенных по передней поверхности пресс блока.

В количественном выражении из (3.2):
При $k' = 0.6$, $\sigma'_{fr} = k'(\sigma_1 + \sigma_e) = 0.6 * 2\sigma_e = 1.2\sigma_e$
При $k'' = 1$, $\sigma''_{fr} = k''(\sigma_1 + \sigma_e) = 1 * 2\sigma_e = 2\sigma_e$.

3.2 Условия течения в зоне пресс блока.

Итак, для элемента материала в зоне контакта с гильзой контейнера и периферией пресс блока есть два взаимно перпендикулярных направления с наибольшим сопротивлением движению – вдоль поверхностей контакта. Учитывая, принятый нами произвол в выборе численных показателей процесса, можно утверждать только, что течение происходит в направлении какого-то острого угла с обеими поверхностями. Но в любых его вариациях характер течения принципиально не меняется (рис.3,3 а). Косвенным свидетельством правильности такого представления является неизменно повторяющаяся форма ”свинячьей морды” удаленного с поверхности гильзы материала при выполнении цикла очистки (cleanout cycle) (Рис. 3.2):

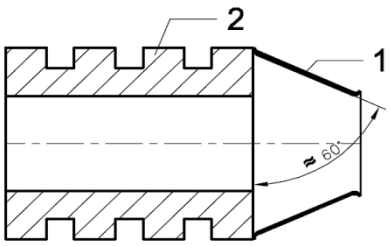
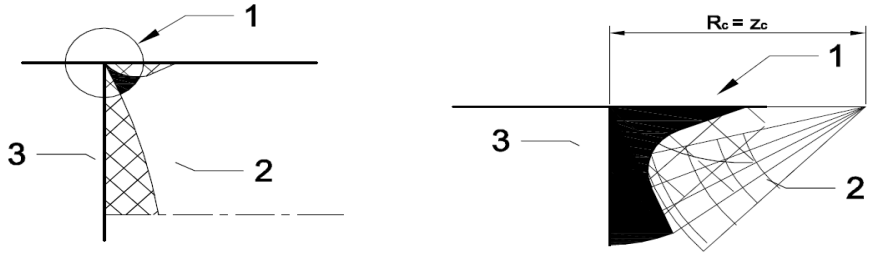


Рис. 3.2 : Типичная форма удаленного металла – 1; 2 – инструмент для цикла очистки гильзы контейнера.

Правомерность аналогии начала цикла экструзии и цикла очистки может быть принята с сомнением. Главное различие этих двух циклов в том, что в цикле очистки течение происходит в свободном пространстве, а в рабочем цикле – в среде напряженного металла. Пока принимаем эту модель течения в качестве гипотезы.



a) b)

Рис.3.3 Зона течения по периферии пресс блока – a; модель течения с одной поверхностью среза – b.

Допуская вариант течения как результат деформации сдвига, выбираем модель с минимальной протяженностью поверхности среза (рис. 3.3 b). В нашем представлении можно ожидать образования клиновидного застойного участка в ”точке” касания двух поверхностей пресс блока и гильзы. В этом случае срез будет происходить по одной поверхности. Следует отметить, что придуманная нами схема может иметь простое позитивное продолжение – стоит создать такой формы клин на кромке наружного кольца пресс блока. Клин будет работать как лопата бульдозера, по-видимому уменьшая сопротивление от трения. В этой модели участок, в котором происходит массоперенос, принимает форму сектора с полем скоростей, перпендикулярных радиальному (для сектора) направлению. Центр вращения сектора на расстоянии $R_c = z_c$, меньшем, чем граница зоны сил трения – z_{max} . Угол сектора определяет конец поверхности среза – начало зоны сваренного материала. Представляя процесс течения как стационарный и упорядоченный можно принять схему движения как простой поворот сектора относительно центра до границы поверхности среза.

4. Итоги анализа по проблеме трения.

4.1 Разработана базовая схема напряженного состояния при объемном сжатии материала с активной линейной нагрузкой. Определены соотношения главных компонент напряжений в однородном поле.

4.2 Разработана физически непротиворечивая модель действия сил трения заготовки по поверхности гильзы контейнера и пресс блока. С целью упрощения анализа в модели не учтено влияние на величину трения скорости и величины хода пресс блока. Оценен уровень влияния сил трения на процесс экструзии. В примере силы трения составляют до 31% от суммарного усилия пресса. Определена область действия сил трения. Область ограничена только зоной, близкой к пресс блоку. По оценке, не более расстояния, равного радиусу гильзы контейнера.

4.3 Разработана вероятная модель течения материала в зоне контакта пресс блока с гильзой контейнера с минимальной площадью поверхностей среза.

Литература.

1. Predip K. Saha Aluminum Extrusion Technology. – Ohio: ASM International, 2000. – 259 p.
2. Aluminium – guide.ru - сайт для профессионалов алюминиевой промышленности.
3. В. Н. Данченко, А. А. Миленин, А. Н.Головко. Производство профилей из алюминиевых сплавов. Ред. В.Н. Данченко.; -Днепропетровск, 2002.
4. Handbook of Aluminum V.1, Edited by George E. Tollen, D. Scott Mackenzie.; - Marcel Dekker. Inc., New York Basel.
5. Extrusion of Aluminum Alloys, T. Sheppard.; - KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, Dortrecht/Boston/London. 1999.
6. Nature of Friction in Extrusion Process and its Effect on Material Flow.; I. Flitta and T. Sheppard. ; - IoM Communications Ltd. 2003.
7. **ВАРИАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ** МЕХАНИКИ. Сборник статей классиков науки. Под ред Л.С.Полак.
8. **М**.Л. Смолянский.Таблицы Неопределенных Интегралов. –М.;1965.
9. **А.** К. Власов., Курс высшей математики для ВТУЗов.; -М.;1946.
10. www.asm.matweb.com

Edited: 05/05/17 