

УДК 621.7

ВОЛОЧЕНИЕ СПЛОШНЫХ ПРОФИЛЕЙ ПРАВИЛЬНОГО МНОГОГРАННОГО СЕЧЕНИЯ

© 2013 г. В.Н. Трофимов, Т.В. Кузнецова, Д.С. Анищук, А.В. Есенеев, М.Г. Штуца

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)
ОАО «Чепецкий механический завод», г. Глазов

При проектировании процесса волочения профилей правильного многогранного сечения удобно использовать аналитические выражения, позволяющие оперативно оценивать влияние разных технологических факторов. Предлагается методика расчета напряжения данного процесса. Получены соотношения для вычисления напряжения волочения, оптимального угла канала волочильного инструмента, предельного значения степени деформации при использовании стандартного инструмента и показателя напряженного состояния в осевой части зоны деформации. Применение волочильного инструмента с оптимальными углами снижает скорость накопления дефектов структуры металла и при многократном волочении дает возможность уменьшить число промежуточных термообработок.

Ключевые слова: многогранный профиль, напряжение волочения, волочильный инструмент, дефекты структуры.

In designing the regular polygonal section shape drawing process, it is convenient to use analytical expressions allowing us to estimate effectively the effect of different process factors. A design procedure of stress calculation for this process is proposed. The ratios for calculation of drawing stress, optimum angle of the drawing tool hole, limit value of deformation degree in using the standard tool and index of stress state in the axial part of the deformation zone are obtained. The use of drawing tools with optimum angles reduces the accumulation rate in the metal structure and in case of repeated drawing allows us to cut down the number of intermediate heat treatments.

Key words: polygonal section shape, drawing stress, drawing tool, structural defects.

Изделия правильного многогранного сечения широко используются в промышленности, в частности в электротехнике. Например, при изготовлении композиционных электропроводников для сверхпроводящих магнитных систем (из ниобия и его сплавов, а также меди) в состав композиционной сборки входят изделия правильного шестигранного сечения.

Для получения многогранных профилей наиболее часто применяют технологический процесс многократного волочения через монолитные волокни. Основным критерием при проектировании этого процесса является коэффициент запаса [1]

$$\gamma = \sigma_B / \sigma_{\text{вол}} \geq 1,$$

где σ_B — предел прочности металла изделия, $\sigma_{\text{вол}}$ — напряжение волочения.

Несмотря на широкое распространение численных методов для определения напряженного

состояния изделий при обработке давлением, в практических расчетах удобно использовать аналитические выражения, позволяющие оперативно оценивать влияние технологических параметров на величины $\sigma_{\text{вол}}$ и γ .

Для нахождения $\sigma_{\text{вол}}$ многогранного профиля авторы работы [1] рекомендуют применять формулу для расчета напряжения волочения круглого профиля, а различие площади контакта и приведенного угла канала волокни учитывать с помощью коэффициента $A = F_{\text{мн}}/F_{\text{кр}}$, где $F_{\text{мн}}$, $F_{\text{кр}}$ — площади контактной поверхности соответственно многогранного профиля и равновеликого профиля круглого сечения.

Недостатком рекомендуемых формул является то, что они не учитывают дополнительных сдвигов на входе и выходе зоны деформации, ведущих к увеличению напряжения волочения, и для учета вли-

Трофимов В.Н. — докт. техн. наук, профессор кафедры динамики и прочности машин ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29). E-mail: dpm@pstu.ru; tvn_perm@mail.ru.

Кузнецова Т.В. — аспирант этой кафедры. E-mail: dpm@pstu.ru.

Анищук Д.С. — нач. производства СПМ в ОАО «Чепецкий механический завод» (427600, Удмуртская Респ., г. Глазов, ул. Белова, 6). E-mail: chmz@post.ru; post@chmz.net.

Есенеев А.В. — нач. участка в том же ОАО. E-mail: chmz@post.ru.

Штуца М.Г. — докт. техн. наук, гл. технолог, зам. технич. директора этого ОАО. Тел.: (341) 419-62-19. E-mail: chmz@post.ru; post@chmz.net.

яния калибрующей зоны инструмента используют величину приведенного угла. Это не позволяет установить область оптимальных углов сужающейся части канала волоочильного инструмента, для которых $\sigma_{\text{вол}}$ принимает минимальное значение, что обеспечивает наилучшие энергосиловые параметры процесса волочения, наименьшие дефектность и обрывность заготовки.

Цель работы состояла в получении аналитических выражений для определения оптимальных углов канала инструмента при волочении профилей правильного многогранного сечения.

Для определения $\sigma_{\text{вол}}$ используем следующие допущения:

- канал волокна имеет форму правильной усеченной пирамиды с требуемой формой сечения;
- положение грани профиля канала волокна определяется углом α_m между осью канала и средней линией грани;
- границы зоны деформации плоские;
- деформируемый материал идеальный жесткопластический;
- напряжения распределены равномерно по сечению заготовки (подход Зибеля);
- вследствие малых углов конусности канала волок принимаем равенство радиальных и нормальных контактных напряжений ($\sigma_r \approx \sigma_n$);
- условие пластичности с учетом знака нормальных напряжений имеет вид $\sigma_x + \sigma_n = \sigma_S$;
- на поверхности контакта нормальные и касательные контактные напряжения распределены равномерно по периметру;
- контактные силы трения определяются законом Кулона: $\tau = f_n \sigma_n$.

Напряжение волочения на выходе из канала волокна определим по формуле

$$\sigma_{\text{вол}} = (\sigma_1 + 2\Delta\sigma)\varphi, \quad (1)$$

где σ_1 — напряжение на выходе из сужающейся части канала волокна вследствие деформации металла; $\Delta\sigma$ — приращение продольного напряжения за счет дополнительных сдвигов на входе и выходе сужающейся части канала волокна; φ — коэффициент или функция, учитывающие влияние калибрующей зоны канала волокна.

Схема зоны деформации в канале волокна для шестигранного профиля представлена на рис. 1.

Вследствие лучевой симметрии для определения напряжения $\sigma_{\text{вол}}$ достаточно рассмотреть условия деформирования одного сектора, ограниченного

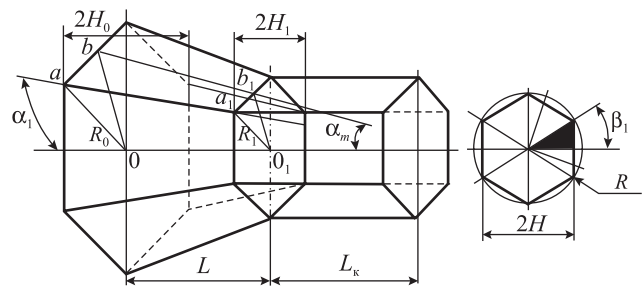


Рис. 1. Схема зоны деформации в канале волокна

R_0, R_1, R — радиусы описанной окружности на входе и выходе зоны деформации и текущее значение радиуса соответственно; $2H_0, 2H_1$ и $2H$ ($H = H_0 - x \text{tg} \alpha_m$) — высота сечения на входе и выходе зоны деформации и ее текущее значение; L — длина зоны деформации; L_k — длина калибрующей зоны; α_m — угол наклона образующей канала волокна, проходящей через середину грани

двумя плоскостями, первая из которых проходит через ось канала и линию стыка граней, а вторая — через ось канала перпендикулярно грани (на рис. 1 сектор показан черным цветом).

Аналогично можно выделить сектор для многогранного профиля с произвольным числом граней, при этом центральный угол раскрытия сектора составит (рис. 2)

$$\beta_1 = \pi/n,$$

где n — число граней.

Для определения напряжения σ_1 используем метод плоских сечений.

С учетом принятых допущений дифференциальное уравнение равновесия элементарного объема зоны деформации длиной dx (рис. 2, 3) имеет вид

$$-\sigma_x H^2 + (\sigma_x + d\sigma_x)(H + dH)^2 - 2f_n \sigma_n H \cos \alpha_m dx - 2\sigma_n H \sin \alpha_m dx = 0, \quad (2)$$

где f_n — коэффициент трения.

Принимая, что на грани Oab действует напряжение противонапряжения $\sigma_x|_{x=0} = \sigma_q$, и учитывая соотношение $dH/dx = -\text{tg} \alpha_m$, из уравнения (2) получим

$$\bar{\sigma}_1 = (1 + f_n \text{ctg} \alpha_m)(1 - \lambda^{-a}) + \bar{\sigma}_q \lambda^{-a}, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1/\sigma_S$ и — относительное напряжение волочения; $\bar{\sigma}_q = \sigma_q/\sigma_S$ — относительное напряжение противонапряжения; $a = \text{tg} \alpha_m / f_n$; $\lambda = F_0/F_1$ — вытяжка; F_0 и F_1 — площади поперечного сечения заготовки до и после деформации; $\text{tg} \alpha_m = (H_0/L)(1 - 1/\sqrt{\lambda})$.

Определим приращение напряжения волочения $\Delta\sigma$. Для этого, учитывая бесконечно малую протя-

женность границ зоны деформации, используем метод верхней оценки, в соответствии с которым мощность сил сдвига на границах, являющихся поверхностями разрыва скоростей, равна [2]

$$W = \int_S \tau_S |\Delta V_{||}| dS, \quad (4)$$

где $\tau_S = \sigma_S / \sqrt{\lambda}$ — сопротивление сдвигу; $\Delta V_{||}$ — разрыв составляющей скорости, параллельной поверхности разрыва S .

Из геометрических соотношений (см. рис. 2 и 3) получим выражение для угла наклона произвольной линии тока dd_1 , расположенной в плоскости Occ_1O_1 :

$$\operatorname{tg} \alpha' = \bar{r} \operatorname{tg} \alpha, \quad \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \alpha_m / \cos \beta, \quad (5)$$

где $0 \leq \bar{r} \leq 1$ — относительный радиус линии тока; $\bar{r} = r_0/R_0 = h_0/H_0 = r'_0/R'_0$; $0 \leq \beta \leq \beta_1$.

С использованием (5) найдем величину W на грани Oab (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} W &= \Delta \sigma S V_0 = \int_S \tau_S \Delta V dS = \\ &= \tau_S V_0 H_0^2 \operatorname{tg} \alpha_m \int_0^{\beta_1} \int_0^{\bar{r}} (1/\cos^3 \beta) d\beta d\bar{r} = \\ &= \frac{1}{6} \tau_S V_0 H_0^2 \operatorname{tg} \alpha_m \operatorname{tg} \beta_1 [(1/\cos \beta_1) + 1]. \end{aligned} \quad (6)$$

Из уравнения (6) после преобразований получим выражение для определения приращения напряжения волочения:

$$\Delta \bar{\sigma} = 0,192 \operatorname{tg} \alpha_m \operatorname{tg}(\pi/n) / \operatorname{tg}(\pi/2n), \quad (7)$$

где $\Delta \bar{\sigma} = \Delta \sigma / \sigma_S$.

Аналогично определим величину $\Delta \bar{\sigma}$ на грани $O_1a_1b_1$.

Используя (1), (3) и (7), запишем уравнение для расчета напряжения волочения правильного многогранного профиля без учета влияния калибрующей части канала:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_k &= \bar{\sigma}_1 + 2\Delta \bar{\sigma} = (1 + f_n \operatorname{ctg} \alpha_m)(1 - \lambda^{-a}) + \bar{\sigma}_q \lambda^{-a} + \\ &+ 0,385 \operatorname{tg} \alpha_m \operatorname{tg}(\pi/n) / \operatorname{tg}(\pi/2n), \end{aligned} \quad (8)$$

где $\bar{\sigma}_k = \sigma_k / \sigma_S$.

Уравнение (8) подтверждает известные экспериментальные данные о том, что за счет дополнительных сдвигов напряжение волочения многогранного профиля больше, чем у равновеликого круглого профиля. Для сравнения приведем данные расчета $\bar{\sigma}_k$ для разных видов многогранных профилей ($\alpha_m = 10^\circ$; $f_n = 0,1$; $\lambda = 1,2$; $\bar{\sigma}_q = 0$) и выражение для третьего слагаемого в формуле (8):

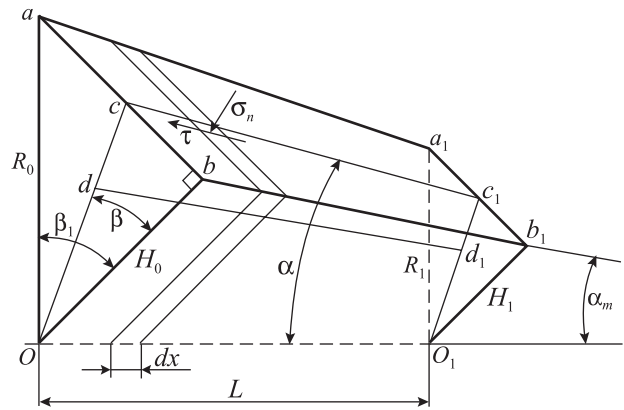


Рис. 2. Схема сектора зоны деформации

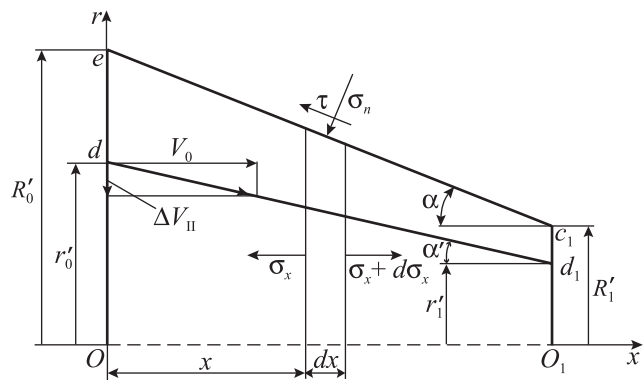


Рис. 3. Схема для определения напряжений σ_1 и $\Delta \sigma$

n	3	4	5	6	∞ (круг)
$\bar{\sigma}_k$	0,475	0,435	0,423	0,418	0,407
$2\Delta \bar{\sigma}$	$1,115 \operatorname{tg} \alpha_m$	$0,929 \operatorname{tg} \alpha_m$	$0,86 \operatorname{tg} \alpha_m$	$0,829 \operatorname{tg} \alpha_m$	$0,77 \operatorname{tg} \alpha_m$

Упростим формулу (8). Принимая $\lambda^{-a} \approx 1 - a \ln \lambda$ [1], получим

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_k &= [1 + f_n \operatorname{ctg} \alpha_m (1 - \bar{\sigma}_q)] \ln \lambda + \bar{\sigma}_q + \\ &+ 0,385 \operatorname{tg} \alpha_m \operatorname{tg}(\pi/n) / \operatorname{tg}(\pi/2n). \end{aligned} \quad (9)$$

Используя формулу (9), определим значение угла α_m , обеспечивающее минимальное значение напряжения волочения из условия

$$\frac{d \bar{\sigma}_k}{d \operatorname{tg} \alpha_m} = - \frac{f_n}{\operatorname{tg}^2 \alpha_m} (1 - \bar{\sigma}_q) \ln \lambda + 0,385 \operatorname{tg}(\pi, n) / \operatorname{tg}(\pi/2n) = 0.$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\alpha_m = \operatorname{arctg} \left(1,612 \sqrt{f_n \ln \lambda (1 - \bar{\sigma}_q) \operatorname{tg}(\pi/2n) / \operatorname{tg}(\pi/n)} \right). \quad (10)$$

Оптимальные значения угла канала волокна для правильных многогранных профилей, рассчитан-

ные по формуле (10) для $f_n = 0,06$; $\lambda = 1,15$; $\bar{\sigma}_q = 0$, будут следующие:

n	3	4	6	∞ (круг)
α_m , град.....	4,87	5,43	5,74	5,96

В реальных условиях, как правило, применяется стандартный волочильный инструмент, для которого значение α_m не является оптимальным. В этом случае формула (10) позволяет определить оптимальное значение вытяжки:

$$\lambda = \exp \left[0,385 \frac{\operatorname{tg}(\pi/n)}{\operatorname{tg}(\pi/2n)} \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha_m}{f_n(1-\bar{\sigma}_q)} \right]. \quad (11)$$

Для учета влияния калибрующей зоны канала волокна используем подход П.Т. Емельяненко и Л.Е. Альшевского [1], которые предложили вести расчет по максимально возможным значениям нормального напряжения, определяемого из условия пластичности

$$\sigma_n = \sigma_S - \sigma_x.$$

Дифференциальное уравнение равновесия для элементарного объема заготовки получим по аналогии с уравнением (2), полагая $\alpha_m = 0$:

$$d\sigma_x F + 2f_n(\sigma_S - \sigma_x)P dx = 0,$$

где F и P — соответственно площадь и периметр поперечного сечения сектора заготовки в калибрующей зоне.

Величина напряжения волочения на выходе из канала волокна (при $x = L_k$) с учетом граничного условия $\bar{\sigma}_{x|_{x=0}} = \bar{\sigma}_k$ будет

$$\bar{\sigma}_{\text{вол}} = 1 - (1 - \bar{\sigma}_k) \exp(-\delta_k), \quad (12)$$

где $\bar{\sigma}_{\text{вол}} = \sigma_{\text{вол}}/\sigma_S$; $\delta_k = f_n(P/F)L_k$; L_k — длина калибрующей зоны.

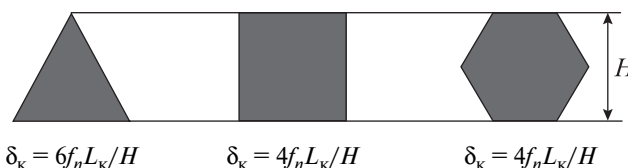
Упростим формулу (12). Разложив экспоненту в ряд Маклорена и используя два первых его слагаемых, получим

$$\bar{\sigma}_{\text{вол}} = 1 - (1 - \bar{\sigma}_k)(1 - \delta_k). \quad (13)$$

Для стандартных волок и большинства пар трения «инструмент—металл» $L_k/H \leq 1$ и $f_n < 0,06$. В этом случае разность результатов расчета по формулам (11) и (12) не превышает 5%.

Коэффициент δ_k в формулах (12) и (13) целесообразно определять, используя характерные размеры сечения многоугольника, легко поддающиеся измерению. Схемы измерения и соответ-

ствующие им формулы для определения δ_k представлены ниже:



При проектировании технологического процесса многократного волочения необходимо оценить скорость накопления поврежденности металла изделия и вероятность его разрушения. Для этого требуется определить показатель напряженного состояния $k = \sigma_0/T$, где $\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_r + \sigma_\phi)/3$ — среднее напряжение; $T = \tau_S$ — интенсивность касательных напряжений [3].

Действительное распределение напряжений по сечению многогранного профиля не соответствует подходу Зибеля и принятому в данной работе условию пластичности, которое следует из критерия пластичности Мизеса при условии равенства радиальных и окружных напряжений $\sigma_r = \sigma_\phi$. Однако применение полученных выше соотношений приемлемо для определения показателя k в осевой части заготовки, где выполняется условие $\sigma_r \approx \sigma_\phi$ и, как показывает опыт, появляются первые признаки разрушения металла.

В осевой части зоны деформации показатель напряженного состояния составляет

$$k = \sqrt{3} \sigma_0/\sigma_S = 1,732\bar{\sigma} - 1,155, \quad (14)$$

где $\bar{\sigma} = \sigma_x/\sigma_S$.

В выражении (14) величина $\bar{\sigma}$ рассчитывается следующим образом:

— на входе в зону деформации

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_q + 0,192 \operatorname{tg} \alpha_m \operatorname{tg}(\pi/n) / \operatorname{tg}(\pi/2n);$$

— в зоне деформации

$$\bar{\sigma} = [1 + f_n \operatorname{ctg} \alpha_m (1 - \bar{\sigma}_q)] \ln[F_0 / F(x)] + \bar{\sigma}_q + 0,192 \operatorname{tg} \alpha_m \operatorname{tg}(\pi/n) / \operatorname{tg}(\pi/2n),$$

где $F(x)$ — текущее значение площади сечения заготовки;

— на выходе из зоны деформации по формуле (9).

Эксперименты показывают [3], что уменьшение k способствует снижению скорости накопления поврежденности структуры металла заготовки и при многократном волочении позволяет увеличить степень деформации при уменьшении числа промежуточных термообработок. Из приведенных

соотношений следует, что использование волок с оптимальными углами обеспечивает наименьшие значения показателя k .

пользовании стандартного инструмента; показатель напряженного состояния в осевой части зоны деформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для правильных многогранных профилей получены соотношения, позволяющие определить: напряжение волочения; угол канала волочильного инструмента, обеспечивающий наилучшие энергосиловые параметры процесса волочения; предельное значение степени деформации при ис-

ЛИТЕРАТУРА

1. *Перлин И.Л., Ерманок М.З.* Теория волочения. М.: Металлургия, 1971.
2. *Джонсон У., Меллор П.* Теория пластичности для инженеров. М.: Машиностроение, 1979.
3. *Колмогоров В.Л.* Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1970.

УДК 669.24'71

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЛАВОВ Ni_3Al-Fe МЕТОДАМИ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

© 2013 г. С.В. Лепихин, Н.Н. Степанова

Уральский федеральный университет (УрФУ)
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург
Институт физики металлов (ИФМ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Методами измерения удельного электросопротивления и дифференциального термического анализа исследована серия тройных сплавов Ni_3Al , легированных железом. Определены температуры фазовых превращений и начала разупорядочения. В жидком состоянии на политермах электросопротивления наблюдается явление гистерезиса при нагреве изучаемых сплавов до критической температуры.

Ключевые слова: интерметаллическое соединение Ni_3Al , легирование, фазовые превращения, разупорядочение, расплав, гистерезис, критическая температура, удельное электросопротивление, дифференциальный термический анализ.

A series of iron-alloyed Ni_3Al triple alloys have been investigated by the electrical resistivity measurement and differential thermal analysis. Phase transformation and softening temperatures are found. In heating the investigated alloys to the critical temperature, the hysteresis phenomenon is observed in liquid state in the resistivity polyterms.

Key words: Ni_3Al intermetallic compound, alloying, phase transformations, disordering, melt, hysteresis, critical temperature, electrical resistivity, differential thermal analysis.

Интерметаллическое соединение на основе Ni_3Al (γ' -фаза) является основной упрочняющей фазой литейных жаропрочных никелевых сплавов, представляющих важную группу высокопроч-

ных материалов, используемых при изготовлении наиболее ответственных деталей газотурбинных двигателей [1, 2]. В настоящее время разработаны и применяются в промышленности сплавы типа

Лепихин С.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности УрФУ (620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). Тел.: (343) 375-47-84. E-mail: lepichin@mail.ru.

Степанова Н.Н. – докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. ИФМ УрО РАН (620991, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18). Тел.: (343) 378-37-11. E-mail: snn@imp.uran.ru.