

Левко В. А.

МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ АБРАЗИВНО-ЭКСТРУЗИОННОЙ ОБРАБОТКЕ ТОНКИХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КАНАЛОВ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ

(Сибирский государственный аэрокосмический университет)

В статье рассмотрена проблема равномерности абразивно-экструзионной обработки каналов большой длины. Для этого разработана модель течения вязкоупругой среды, наполненной абразивными частицами. Наблюдаемая экспериментально в линии тока рабочей среды совокупность абразивных зерен представлена в виде цепочки, состоящей из последовательно соединенных одинаковых элементов. Каждый элемент деформируется независимо от остальных, а условие неразрывности цепочки обеспечивается соединением сегментов вязкоупругой среды в шариках, моделирующих абразивные частицы. Условия обработки определяются напряженно-деформированным состоянием рабочей среды. Величина деформации зависит от градиента скорости потока на стенке канала. Выявлено, что при установившемся течении соотношение между нормальными и касательными напряжениями рабочей среды сохраняются по всей длине обрабатываемого канала.

Ключевые слова: *абразивно-экструзионная обработка, вязкоупругая среда, деформация, сдвиговое течение, абразивное зерно, обрабатываемый канал, установившийся режим, цепочка, сегмент.*

Рассматривается задача построения модели течения вязкоупругой среды, наполненной абразивными частицами, в тонком осесимметричном канале большой длины.

Такой вид течения характерен для технологии экструзионного хонингования или абразивно-экструзионной обработки (АЭО). Вязкоупругая среда при АЭО при течении принимает форму обрабатываемого канала, что позволяет осуществлять финишную обработку внутренних поверхностей различных сложнопольных деталей [6, 7]. Параметры течения наряду с геометрическими характеристиками обрабатываемого канала и свойствами материала определяют вид контактных взаимодействий микронеровностей поверхностного слоя обрабатываемого канала и абразивных зерен, перемещаемых в канале потоком вязкоупругой среды [3].

Существующие расчетные модели для АЭО [8] построены на использовании модели вязкопластичной среды Бингама, реологическое уравнение которой имеет вид

$$t = t_0 + \dot{g} h_B, \quad (1)$$

где t – напряжение сдвига; t_0 – предельное напряжение сдвига; \dot{g} – скорость сдвига; h_B – пластическая вязкость.

При напряжениях $t > t_0$ реализуется вязкое сдвиговое течение среды, а зависимость вязкости от напряжения сдвига линейна. Это положение позволило для оценки распределения скорости и давления потока в канале при АЭО применить различные гидродинамические модели, в частности – уравнение Пуайзеля для круглого канала [8]

$$V_0 = \frac{R^{n+1}}{2^n \cdot h_0^n \cdot (n+1)} \cdot \left(\frac{dP}{dx} \right)^n, \quad (2)$$

где V_0 – скорость потока на центральной оси канала; $\frac{dP}{dx}$ – продольный градиент давления; n – индекс течения, характеризующий степень отклонения вязкостных свойств данной среды от свойств ньютоновской жидкости; R – радиус канала; h_0 – коэффициент начальной динамической вязкости.

При анализе применимости данного подхода авторы констатируют [8], что расчеты сил резания на основе приведенной модели при $n=1$ приводят к значительным погрешностям. Расчетные значения величин составляющих сил резания на порядок меньше, чем у значений, определенных экспериментально.

Такие значительные расхождения объясняются тем, что в данной модели не учитывается влияние на условие контакта нормальных напряжений, возникающих в потоке среды [4], т.е. при $t > t_0$ в потоке среды при АЭО реализуется не вязкопластическое, а вязкоупругое течение.

Кроме того, из (2) следует, что в каналах большой длины характерно появление неравномерности обработки по длине канала вследствие перепада давления на входе и выходе обрабатываемого канала [5, 7].

Таким образом, в настоящее время существует проблема теоретического расчета зависимости производительности и качества АЭО от регулируемых параметров процесса – состава рабочей среды и величины напряжения сдвига, что существенно сдерживает широкое применение метода АЭО в производстве [8]. Особенно это проявляется при внедрении АЭО для финишной обработки прямоугольных или круглых трубных заготовок большой длины (>1000 мм) и малым поперечным сечением (1,8 x 3,6 мм) или радиусом ($R < 4$ мм).

Для описания напряженно-деформированного состояния потока среды в таких каналах необходимо конкретизировать некоторые неизвестные функции, относящиеся к реологическим определяющим отношениям. Применение феноменологического подхода сопряжено с большими сложностями, т.к. в модели необходимо учитывать большее количество неизвестных функций. Поэтому для оценки предложено применение статистического или микроструктурного подхода.

При визуальных исследованиях потока рабочей среды в каналах разных конфигураций установлено [9], что сдвиговое течение при АЭО имеет доминирующее направление, оказывающее существенное влияние на характер перемещения абразивных частиц.

При этом частицы перемещаются по траекториям, которые, как правило, совпадают с линиями тока. Это наблюдение позволило сделать предположение о том, что при установившемся режиме течения наблюдается появление совокупностей абразивных зерен, перемещающихся по одной траектории, образованных линиями тока вязкоупругой среды.

Для случая потока среды в тонком прямоугольном канале постоянного сечения и большой длины можно сделать следующее предположение. Наблюдаемую в линии тока совокупность можно представить в виде цепочки, состоящей из последовательно соединенных одинаковых элементов – сегментов, каждый из которых деформируется независимо от остальных, а условие неразрывности цепочки обеспечивается соединением сегментов вязкоупругой среды в шариках, моделирующих абразивные частицы, окруженные сольватной оболочкой. Сольватная оболочка представляет собой часть среды, физические свойства которой изменены вследствие возникновения поверхностных сил на границе абразивное зерно – вязкоупругая среда. В целом, в потоке можно выделить ряд цепочек, деформирующихся параллельно и разделенных вязкой средой. Поскольку течение установившееся, предполагаем, что между цепочками при течении не возникает упругих взаимодействий.

Вязкоупругие свойства всех сегментов цепочки принимаются подобными и могут быть описаны при помощи различных моделей. Так полная деформация сегмента g является суммой мгновенно-упругой g_0 , запаздывающей (высокоэластической) g_e и пластической (вязкого течения) g_f деформаций – $g = g_0 + g_e + g_f$. Данный вид деформации можно представить с помощью различных моделей, в частности модели Бургерса – Френкеля (рис. 1).

Смещение каждого элемента моделирует относительную деформацию, а необходимая для данной деформации сила отвечает напряжению. Каждая компонента деформации в данной модели связана с напряжением линейно:

$$g_0 = t/G_0 ; h_1 \dot{g}_e + Gg_e = t ; \dot{g}_f = t/h , \quad (3)$$

где t – касательные напряжения; G_0 – модуль мгновенно-упругой деформации; G – модуль упругости при сдвиге; h – вязкость окружающей среды; h_1 – вязкость цепочки.

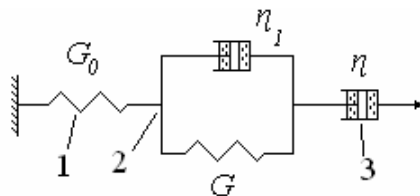


Рис. 1. Модель Бургерса – Френкеля: 1 – пружина, моделирующая мгновенно-упругую деформацию; 2 – элемент из параллельно соединенных пружины и демпфера, моделирующий запаздывающую деформацию; 3 – демпфер, моделирующий вязкое сопротивление деформированию

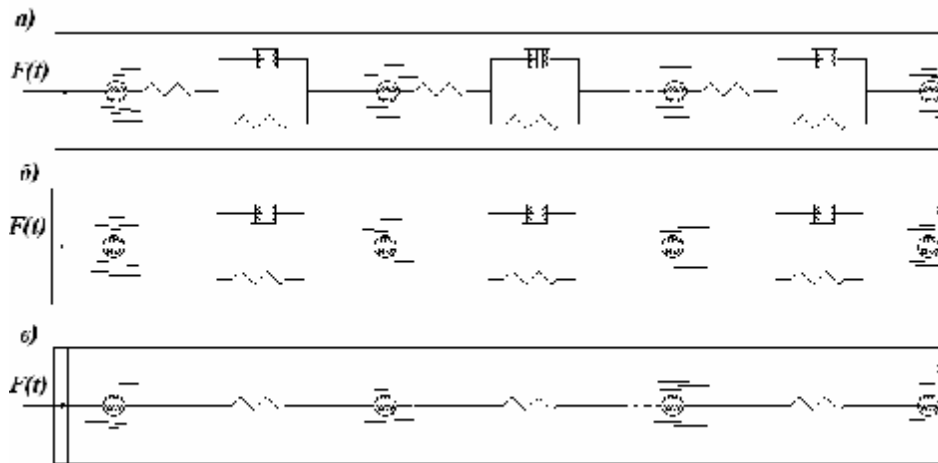


Рис. 2. Преобразованная модель Каргина – Слонимского – Рауза: а) полная модель с учетом мгновенно-упругой деформации и внутренней вязкости; б) модель без учета мгновенной деформации; в) модель без учета внутренней вязкости

Разделение цепочки на сегменты условно и должно в дальнейшем быть подтверждено экспериментальными данными. В связи с этим предположением для описания режимов деформирования среды при АЭО возможно применить некоторые варианты преобразованной модели Каргина – Слонимского – Рауза (КСР), приведенной в [1]. Преобразование модели заключается в изменении схемы нагружения. В модели КСР один конец цепочки закреплен, а ко второму приложена растягивающая внешняя сила $F(t)$. В рассматриваемой модели внешняя сила приложена к одному концу, а второй конец свободно перемещается в некоторой среде (рис. 2).

Вязкое сопротивление перемещению демфера соответствует взаимодействию цепочки с окружающей средой, которая препятствует ее перемещению относительно потока среды и других цепочек. Такое взаимодействие характерно и для случая АЭО и соответствует модели 2, а. Известно, что для всех вязкоупругих систем модуль мгновенно-упругой деформации G_0 гораздо больше, чем модуль G , связанный с высокоэластическими деформациями. Здесь модель КСР для случая АЭО тоже может быть упрощена к виду, показанному на рис. 2, б. Элементы этих двух моделей описывают запаздывающую деформацию, связанную с несовершенной упругостью образовавшейся цепочки. Обусловленная этим диссипация энергии характеризует внутреннюю вязкость самой цепочки.

Для случая АЭО можно пренебречь сопротивлением деформированию, обусловленной внутренней вязкостью цепи по сравнению с эффектом ее взаимодействия с окружающей средой, и получить еще более простую модель (рис. 2, в). Данные модели являются одномерными и могут передать особенность поведения проекции цепочки, расположенной на центральной оси потока, на выбранное направление в пространстве.

Предположим, что к одному из концов цепочки посредством поршня прикладывается внешняя сила $F(t)$. При этом в среде возникает сопротивление движению i -того шарика, равное произведению эффективной вязкости среды h на скорость движения ша-

рика, т.е. $h(du_i/dt)$. Усилие, действующее на пружину с модулем G , можно выразить как произведение G на разность координат концов пружины, которая представляет собой величину относительной деформации (сжатия) пружины. Усилие, действующее на демпфер с вязкостью h_1 , зависит от разности скоростей смещения шариков, окружающих этот демпфер. Коэффициент эффективной вязкости h учитывает потери потока не только на вязкое течение, но и на трение со стенками канала, а также потери вызванные взаимодействием цепочек между собой.

Тогда, условия равновесия первого шарика, находящегося на свободной поверхности среды, можно записать как

$$h \frac{du_1}{dt} + h_1 \left(\frac{du_1}{dt} - \frac{du_2}{dt} \right) - G(u_1 - u_2) = 0. \quad (4)$$

Условия равновесия i -того шарика зависят от окружающей среды и двух пар демпфер – пружина

$$h \frac{du_i}{dt} + h_1 \left[\left(\frac{du_i}{dt} - \frac{du_{i+1}}{dt} \right) - \left(\frac{du_{i-1}}{dt} - \frac{du_i}{dt} \right) \right] - G[(u_i - u_{i+1}) - (u_{i-1} - u_i)] = 0. \quad (5)$$

Последний $(n+1)$ -й шарик испытывает влияние окружающей среды, одной пары демпфер – пружина и внешней силы

$$h \frac{du_{n+1}}{dt} + h_1 \left(\frac{du_{n+1}}{dt} - \frac{du_n}{dt} \right) - G(u_{n+1} - u_n) = F(t). \quad (6)$$

Система уравнений (4) – (6) определяет зависимость движения цепочки на оси канала под действием заданной силы. В упрощенном варианте модели $h_1 = 0$. Из модели КСР известна форма записи i -того уравнения данной системы.

В нормальных координатах $y_i = u_i - u_{i+1}$ система (4) – (6) принимает вид:

$$\begin{cases} h \frac{y_1}{dt} + h_1 \left(2 \frac{y_1}{dt} - \frac{y_2}{dt} \right) - G(2y_1 - y_2) = 0, \\ h \frac{y_i}{dt} + h_1 \left(2 \frac{y_i}{dt} - \frac{y_{i+1}}{dt} - \frac{y_{i-1}}{dt} \right) - G(2y_i - y_{i+1} - y_{i-1}) = 0, \\ h \frac{y_n}{dt} + h_1 \left(2 \frac{y_n}{dt} - \frac{y_{n-1}}{dt} \right) - G(2y_n - y_{n-1}) = F(t). \end{cases} \quad (7)$$

Записанные n линейных дифференциальных уравнений первого порядка образуют систему относительно n неизвестных функций y_i . Решение такой однородной системы (без правой части) известно:

$$y_i = \sum_{m=1}^n C_m e^{-S_m t}, \quad (8)$$

где C_m и S_m – подлежащие определению константы.

Значения S_m записаны для двух случаев [9]:

при $h_1 \neq 0$

$$S_m = \frac{4G \left[\sin \frac{mp}{2(n+1)} \right]^2}{h + 4h_1 \left[\sin \frac{mp}{2(n+1)} \right]^2}, \quad (9)$$

при $h_1 = 0$

$$S_m = \frac{4G}{h} \left[\sin \frac{mp}{2(n+1)} \right]^2. \quad (10)$$

Для рассматриваемого случая установившегося движения по центральной оси потока при АЭО представляет интерес временная зависимость смещения начала цепочки, т.е. $(n+1)$ -го шарика при постоянной действующей силе $F(t) = F_0 = const$:

$$u_{n+1}(t) = \frac{F_0 t}{h(n+1)} - F_0 \sum_{m=1}^n B_m (1 - e^{-t/I_m}). \quad (11)$$

Для упрощенного варианта модели (рис. 2, в) структура величин $I_m = s_v^{-1}$ и B_m выражаются через уравнения (12) и (13) соответственно:

$$I_m = \frac{h}{4G} \left[\sin \frac{mp}{2(n+1)} \right]^{-2}, \quad (12)$$

$$B_m = \frac{1}{2G(n+1)} \left[\operatorname{ctg} \frac{mp}{2(n+1)} \right]^2. \quad (13)$$

Полное смещение складывается из линейно зависящего от времени первого члена формулы (11) и суммы членов, зависящих от времени экспоненциально. Необратимое течение соответствует вязкопластическому деформированию среды и смещению центра тяжести цепочки. При установившемся режиме необратимые деформации неограниченно увеличиваются во времени, т.е. реализуется сдвиговое течение.

Движение конца цепи относительно центра тяжести соответствует упругой деформации, а константы I_m являются временами запаздывания системы. Упругие деформации также увеличиваются, но, приближаясь к некоторому асимптотическому значению $u_e(\infty)$.

Основной задачей по выбору состава рабочей среды является обеспечение такого сочетания ее вязкоупругих свойств, которое бы позволило создать с одной стороны, требуемые расходно-напорные характеристики потока в обрабатываемом канале, а с другой стороны – максимально возможные усилия по взаимодействию абразивного зерна к обрабатываемой поверхности.

Из четырех констант материала, характеризующих упругие свойства рабочей среды, на основе стандартных методик определены величины модуля Юнга E и коэффициента Пуассона μ , через которые установлена величина модуля упругости при сдвиге

$$G = \frac{E}{2(1+m)}. \quad (14)$$

Количество шариков n в цепочке и длина сегмента цепочки зависят от степени наполнения среды абразивными частицами и длины рабочего тела в обрабатываемом канале. Величина эффективной вязкости рабочей среды определена по методике [3].

В силу размеров шарика 1 (рис. 3), моделирующего абразивное зерно с сольватной оболочкой, модель цепочки должна учитывать градиент скорости сдвига потока на ее верхней 2 и нижней границах 3. Величина сольватной оболочки формирует поперечные размеры линии тока.

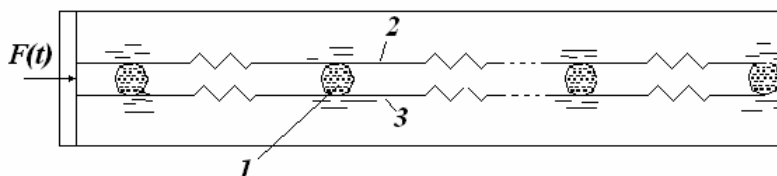


Рис. 3. Модель плоской вязкоупругой цепочки при АЭО, учитывающей ее размеры и разность скоростей потока рабочей среды

Для расчета цепочки, деформирующейся вдоль центральной оси потока, где отсутствует градиент скорости сдвига, достаточно применения уравнений (4) – (13). Для расчета цепочек, деформирующихся в зоне с существенным градиентом скорости сдвига, необходимо учитывать пространственные эффекты, возникающие при простом сдвиге в упругом теле (рис. 4).

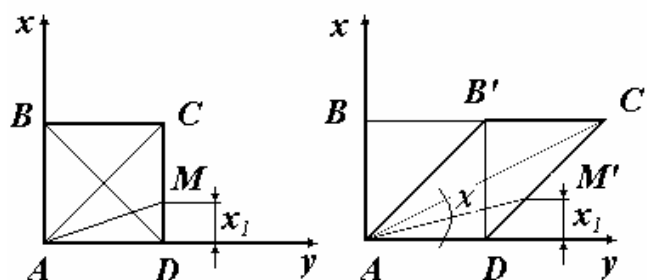


Рис. 4. Схема простого сдвига в сегменте цепочки

Выделим некоторый объем среды, заключенный в единичном сегменте цепочки между двумя соседними шариками. При установившемся течении размеры линии тока не изменяются. Принимаем, что и расстояние между центрами шариков остается постоянным u_i . Тогда вследствие деформации, вызванной градиентом скорости сдвига, диагональ AC удлинится до AC' , а отрезок AM , отстоящий от оси y на расстоянии x' , удлинится до отрезка AM' . Величина сдвига $g = BB'$ равна градиенту скорости сдвига потока. Тогда относительная деформация e произвольного отрезка AM

$$e = \frac{AM'}{AM} = \left[\frac{(1+gx_1)^2 + x_1^2}{1+x_1^2} \right]^{0,5}. \quad (15)$$

Максимальное значение относительной деформации e соответствует удлинению диагонали AC до AC' , при котором возникает главное напряжение S_1 . В перпендикулярном ей направлении возникает главное напряжение S_2 , вызванное изменением BD до BD' . Угол c находится между линией действия главного напряжения S_1 и направлением сдвига. Касательные напряжения на площадках, ориентированных к направлению сдвига под углом c равны нулю, что позволяет для выделенного объема записать все компоненты действующих напряжений

$$\begin{aligned} s_{11} &= s_1 \cos^2 c + s_2 \sin^2 c, \\ s_{22} &= s_1 \sin^2 c + s_2 \cos^2 c, \\ t = s_{12} &= -\frac{1}{2}(s_1 - s_2) \sin 2c, \\ s &= s_{11} - s_{22} = (s_1 - s_2) \cos 2c. \end{aligned} \quad (16)$$

где S_{ij} – компоненты тензора напряжений.

Из соотношений (16) видно, что в случае $s_1 - s_2 \neq 0$ всегда возникают нормальные напряжения. Соотношение между касательными и нормальными напряжениями выражается через угол c как $s/2t = ctg 2c$, а тангенс угла c при ориентации главных напряжений вдоль и перпендикулярно диагонали AC' (рис. 4), находится как $tg c = (1+g)^{-1}$. Тогда на основании вышеназванного соотношения между напряжениями и схемы простого сдвига в сегменте можно записать

$$s/2t = ctg 2c = (2+g)g/2(1+g). \quad (17)$$

В данных расчетах не учитывается влияние вращения абразивной частицы и ее сольватной оболочки на напряженно-деформированное состояние среды. Из рассмотрения модели статистического макромолекулярного клубка в гидродинамическом поле (модель Бики и модель Кирквуда – Райзмана – Зимма), можно принять, что в сдвиговом потоке с градиентом скорости g' абразивное зерно и сольватная оболочка будут вращаться с угловой скоростью, в среднем равной $g'/2$.

При известных значениях коэффициента эффективной вязкости среды h , градиента скорости сдвига потока, модуля упругости при сдвиге G , длины сегмента цепочки и размера сольватной оболочки на основании предложенной модели возможен приближенный расчет напряженно-деформированного состояния потока наполненной вязкоупругой среды при установившемся течении на стенке в тонком осесимметричном канале большой длины. В таких каналах влиянием формы поперечного сечения на поток можно пренебречь и свести картину течения от объемного к плоскому состоянию.

В первоначальный момент приложения нагрузки $F(t)$ при $h_1 = 0$ в цепочке происходит последовательная упругая деформация сегментов и условия равновесия первого шарика, i -того шарика и $(n+1)$ -го шарика различны и $y_1 < y_i < y_n$. По цепочке проходит волновой процесс сжатия сегментов до величины, зависящей от длины и диаметра

сегмента, а также от модуля упругости при сдвиге G . При этом увеличивается диаметр сегмента цепочки, что ведет к возникновению упругих взаимодействий между соседними цепочками, которые начинают препятствовать процессу сжатия сегмента. Этот процесс также носит волновой характер и будет рассмотрен в дальнейших работах.

При установившемся режиме сдвигового течения скорости движения всех шариков (du_i/dt) одинаковы, времена запаздывания системы I_m достигают своих максимальных значений, упругие деформации приближаются к асимптотическому значению $u_e(\infty)$. Тогда и условия равновесия для всех сегментов цепочки подобны и $y_1 = y_i = y_n$, т.е. не зависят от длины цепочки (обрабатываемого канала). Величина сжатия e сегментов цепочки на оси канала в данном случае перестает быть зависимой от длины канала, т.е. от режима вязкоупругого течения. На центральной оси канала поток движется подобно сжатому упругому стрежню.

Основное влияние на процесс АЭО оказывает напряженно-деформированное состояние потока возле стенки обрабатываемого канала, вызванная градиентом скорости потока. Рассмотрим цепочку, деформирующуюся на стенке канала. Для такой цепочки характерна разная скорость вязкого течения верхней и нижней границы с проявлением пространственных эффектов, описываемых уравнениями (15) – (17).

Для проверочного расчета по предложенной модели по методикам [3] определены величины эффективной вязкости $h = 30000$ Па·с, модуля Юнга $E = 130200$ кг/м² и модуля упругости при сдвиге $G = 46500$ рабочей среды, состав которой выбран по проведенным исследованиям [6]: каучук СКТ – 30 %, мелкодисперсный фторопласт Ф-4 – 4 %, абразивная паста 23АМ50 – 66 %. Величина зерна с сольватной оболочкой ≈ 100 мкм. Расстояние между соседними зёрнами (шариками) в цепочке при установившемся течении ≈ 300 мкм. Число шариков n в цепочке, образовавшейся в канале длиной 4 м, составляет ≈ 13000 . Экспериментально определена максимальная скорость потока – 0,0054 м/с и градиент скорости сдвига установившегося течения в длинном канале – $g' = 3,0$ с⁻¹. Для рассматриваемого случая $e \approx 0,36$.

Величина сдвигающей силы $F(t) = 160$ Н найдена из произведения значения давления среды $P_{ex} = 12,0$ МПа, измеренного на входе в канал, на площадь поперечного сечения канала $2,6 \times 5,2$ мм. Из (15) с учетом геометрических размеров сегмента $0,1 \times 0,3$ мм и градиента скорости сдвига найдены относительные деформации $e_1 = 1,924$ и $e_2 = 0,316$. Из (17) величина угла $c \approx 14^\circ$. Тогда из отношений $s_1 = e_1 E$ и $s_2 = e_2 E$ следует, что $s_1 \approx 250500$ и $s_2 \approx 41140$. Из (16) $s_{11} \approx 45060$, $s_{22} \approx 246600$, $t \approx 28360$. Такие соотношения между величинами напряжений сохраняются по всей длине обрабатываемого канала и позволяют осуществлять АЭО каналов большой длины.

В более точных моделях необходимо будет учитывать осцилляцию величин напряжений, вызванную волновым характером деформации цепочки и возникающих упругих взаимодействий между цепочками.

г. Красноярск

Поступила: 23 ноября 2007 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Виноградов, Г. В.* Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – М. : Химия, 1977. – 440 с.
2. *Левко, В. А.* Абразивно-экструзионная обработка. Современный уровень, проблемы и направления развития. / В. А. Левко // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 6, – С. 125 - 129.
3. *Левко, В. А.* Влияние состава рабочей среды на технологические режимы абразивно-экструзионной обработки сложнопрофильных деталей / В. А. Левко, Е. Б. Пшенко // Вестник СибГАУ. – 2006. Выпуск 11. – С. 64 – 68.
4. *Левко, В. А.* Интенсификация процессов абразивно-экструзионной обработки деталей летательных аппаратов: автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук // Красноярск, САА, 1998. – 18 с.
5. *Левко, В. А.* Особенности реологии рабочей среды при абразивно-экструзионной обработке / В. А. Левко // Вестник СибГАУ. – 2005. Выпуск 7. – С. 96-100.
6. *Сысоев, С. К.* Абразивно-экструзионная обработка прямоугольных каналов волноводов миллиметрового диапазона / С. К. Сысоев, В. А. Левко, А. А. Левко // Повышение качества изготовления деталей машин методами отделочно-упрочняющей обработки: материалы Всесоюзной конференции, Пенза. – 1991. – С. 84-85.
7. *Сысоев, С. К.* Обеспечение точности расхода компонентов топлива через каналы деталей, обработанных экструзионным хонингованием / С. К. Сысоев, М. А. Лубнин, В. А. Левко и др. // Технология машиностроения. – 2007. – №6. – С. 48-52.
8. *Сысоев, С. К.* Технология отделки РК-профильных отверстий абразивно-экструзионной обработкой / С. К. Сысоев, А. Н. Тимченко, В. А. Левко // Вестник машиностроения. – 1991. – №1. – С. 65-67.
9. *Сысоев, С. К.* Экструзионное хонингование деталей летательных аппаратов: теория, исследования, практика: монография / С. К. Сысоев, А. С. Сысоев. – Красноярск : Изд-во СибГАУ, 2005. – 220 с.