

**ДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРУБО-СРЕДНЕГО  
ПРЯМОТОЧНОГО ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ НА ВОЛОЧИЛЬНОМ  
СТАНЕ С АВТОМОБИЛЬНОЙ ТРАНСМИССИЕЙ В КАЧЕСТВЕ  
ПРИВОДА**

*Кузнецов Сергей Александрович,*

*кандидат технических наук, доцент Череповецкого государственного  
университета (ЧГУ), г. Череповец Вологодской области.*

*Скородумов Иван Сергеевич,*

*студент ЧГУ 5-го курса.*

*Скородумова Екатерина Анатольевна,*

*студент ЧГУ 5-го курса.*

Общий проект, поставленный перед нами в качестве цели: Создание «Проблемной научно-исследовательской технико-технологической учебной лаборатории» при вузе – Череповецком государственном университете. Лаборатория ПНИТТУЛ будет анализировать грубо-среднее волочение проволоки, волочение в передовом, прямоточном режиме. Осуществлять прямоточное волочение будет привод, в его качестве применена ходовая часть с трансмиссией, например, грузового автомобиля КамАЗ-65111.

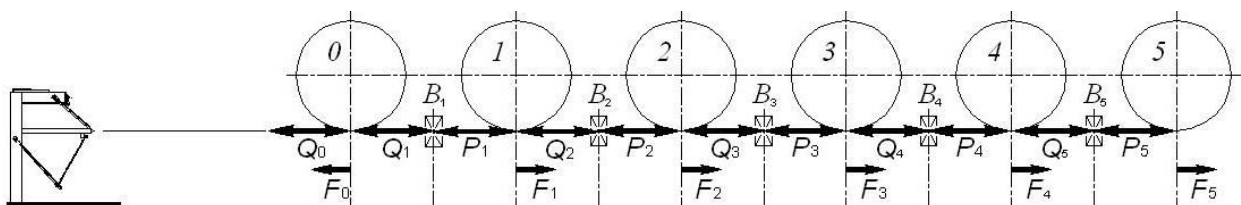
В предыдущей статье «Подготовка и анализ различных методов динамического моделирования шестикратного прямоточного волочения» было произведено моделирование работы многократного волочильного стана прямоточного типа, при этом необходимо было подобрать рабочий сортамент горячекатаной заготовки (катанки). Далее, определившись с частными обжатиями, было произведено кинематическое моделирование процесса многократного волочения. Были определены все скорости чисто с геометрической точки зрения. Главные из них – скорости протяжки катанки на всех переходах.

Закончить динамическое моделирование нужно определением мощности асинхронного электродвигателя нормального типа с короткозамкнутым рото-

ром, т.е. переменного тока и его марки. Кроме того, Лаборатории ПНИТТУЛ будет изучать и калибровку длинномерных цилиндрических заготовок, диаметры которых будут подходить к приводу прямоточного волочильного стана, станина которого составлена из ходовой части с трансмиссией грузового автомобиля, например, КамАЗ-43253.

### § 1. Попытки подготовки и анализа различных методов динамического моделирования 5-кратного прямоточного волочения

Схема динамического моделирования 5-кратного прямоточного волочильного стана с обозначениями геометрических и силовых параметров не отражает всей совокупности существенных признаков этого технического решения. Иллюстрирует такие расчёты рис. 1.



**Рис. 1.** Схема к динамическому моделированию 5-кратного прямоточного волочения: 0...5 - номера барабанов;  $B_1...B_5$  - переходы;  $F_n$  - усилия от крутящих моментов на шпинделях барабанов;  $Q_n$  - натяжение проволоки на участках от предыдущих ( $n - 1$ ) барабанов до данных ( $0 \neq n \neq 1$ ) переходов (противонатяжения);  $P_n$  - усилия протяжки на данном переходе;  $Q_0$  - противонатяжение от размотки проволоки;  $Q_1$  - противонатяжение от обратного включения в кинематическую цепочку 0-го волочильного барабана.

Итак, предполагаемый [1] ход динамического моделирования – последовательность действий, которую можно представить следующим списком:

1. Составим общее уравнение равновесия всего участка деформируемой передельной проволоки. Учтём усилия, приложенные к проволоке каждым барабаном (активные силы, иницирующие) и каждым волочильным инструментом (пассивные силы, нагрузка). Согласно обозначениям на рис. 1, это уравнение будет иметь вид (например, для малоуглеродистой стали 20):

$$- Q_0 - F_0 + F_n + Q_n + P_n + R_n + P_n = 0. \quad (1)$$

Усилие  $Q_0$  - усилие размотки исходной катанки. Усилие  $F_0$  - нагрузка на шпиндель 0-го барабана. Усилия  $F_n$  - силы, обусловленные крутящими моментами на шпинделях каждого из барабанов. Усилия  $Q_n$  - усилия противонатяжения. Усилия  $P_n$  - усилия волочения. Усилия  $R_n$  - затраты сил на проводку

проводами через каждый волочильный инструмент (реакции). Усилия  $P_n$  - усилия намотки готовой проволоки на шпулю (если есть).

2. Исследуем все входящие неизвестные (величины со знаком «-» имеют явно обратную (влево) направленность, для остальных – знак «+» имеет алгебраический смысл). Параметры  $Q_0$  и  $P_n$  – известные (заданные), остальные – неизвестные, по числу переходов:  $n = 5$ , всего их  $4 \times 5 = 20$ . Отсюда следует, что необходимо минимум ещё 19 частных уравнений равновесия, поскольку одно общее уравнение (1) равновесия уже есть. Для удобства уравнения необходимо нумеровать.

3. Определимся с методикой решения системы уравнений (рис. 1). По усилиям  $F_n$  нужно будет определить крутящие моменты, чтобы по ним определить мощность двигателя. Усилия  $Q_{n-1}$  – усилия натяжения передельной проволоки на участке от предыдущего ( $n - 1$ ) барабана до данного ( $n$ ) перехода. Это – противонатяжение для этого перехода. На этом участке диаметр  $d_{n-1}$  передельной проволоки. Напряжение  $\sigma_{n-1}$  растяжения не должно достичь предела текучести  $\sigma_T$  металла передельной проволоки в состоянии после суммарной деформации; сила  $P_n$  – усилие волочения на этом переходе.

4. Составим систему уравнений, описывающих динамику прямоточного волочения. Уравнение (1) – уравнение равновесия передельной проволоки на протяжении всего стана. Поскольку пока принято, что диаметры барабанов равны, активные силы  $F_n$  также равны между собой, исключение – усилие  $F_0$ , обеспечивающее противонатяжение на 1-м переходе. Оно имеет обратный знак. Решив уравнение относительно неизвестных  $F_n$ , достигнем поставленной цели, определив все энергозатраты и подобрав электродвигатель. Но это – конечная цель, достичь её можно, решив все частные задачи определения др. параметров, входящих в уравнение (1). Рассмотрев рис. 1, видим, что эти параметры подобным образом характеризуют каждый из 5-ти переходов и, вместе с уравнением (1), составят систему из 6-ти уравнений с 6-ю неизвестными, за 5 из которых удобно взять усилия волочения  $P_n$ .

5. Чтобы составить 5 частных уравнений с учётом противонатяжения для каждого перехода, в соответствии со сниженной до 5-ти кратностью стана,

$$\mu_n^5 = \frac{d_1^2}{d_5^2}, \text{ откуда, подставляя значения, получим } \mu_n^5 = \frac{6,5^2}{1,8^2} = \frac{42,25}{3,24} = 13,04. \text{ Отсюда}$$

$\mu_n = \sqrt[5]{13,04} = 1,671$ , что близко к максимальной частной вытяжке для ст. 20 при частном обжатии  $\delta_n = 0,41$ . Далее найдём диаметры проволоки для каждого перехода и заполним табл. 1 с исходными данными.

**Т а б л и ц а 1. Характеристики маршрута многократного волочения малоуглеродистой проволоки.**

№	Параметры \ Переходы:	0	1	2	3	4	5
1	Частные обжатия, $\delta_n$ %	-	41	41	41	41	41
2	Частные вытяжки, $\mu_n$ %	-	167,1	167,1	167,1	167,1	167,1
3	Диаметры проволоки, $d_n$ , мм	6,5	4,993	3,835	2,946	2,263	1,738
4	Скорости протяжки, $v_n$ , м/с	2,6	2,665	4,286	7,163	11,97	20
5	Диаметры барабанов, $D_n$ , мм	650	650	650	650	650	650

6. Как было показано в [1], если решать задачу по нахождению усилий  $P_n$  волочения (формула И.Л. Перлина), усилия (и напряжения) противонатяжения  $Q_n$  (и  $\sigma_{q(n)}$ ) на этих 5-ти переходах следует брать как можно более выгодными, т.е. максимально возможными. С др. стороны, согл.[2, табл. 13, с. 139], при максимальном коэффициенте эффективности противонатяжения  $\gamma_q = 0,375$  усилие волочения  $P_q = 95$  Н при напряжении противонатяжения 40 Н (производилось волочение медной проволоки с 0,8 мм до 0,7 мм). Преобразовав эти указанные усилия в напряжения, получим  $\sigma_{вq} = 158$  МПа и  $\sigma_{q \text{ крит}} = 107$  МПа. Отсюда следует вывод, что напряжение противонатяжения можно брать как 0,67  $\sigma_T$ . Т.о., коэффициент 0,67 выглядит весьма подходящим для прямоточного волочения, и для учёта противонатяжения на каждом переходе он также весьма подходит.

7. Напряжения натяжения передельной проволоки до и после волок (и барабанов) определяют по формуле И.Л. Перлина как напряжения волочения при напряжениях противонатяжения [2, (VII-56-a) с.198]. Упрочнение из-за деформации, естественно, учитывают необходимо и обязательно. Если реальное противонатяжение меньше критического, то расчётное  $\sigma_q$  принимаем

$\sigma_q = \sigma_{q \text{ крит}}$ , а если реальное противонапряжение больше, то расчётное есть реальное  $\sigma_q$ . Ранее было решено критическое противонапряжение вычислять по коэффициенту 0,67 от  $\sigma_T$ . Но чтобы примерно привязать этот коэффициент к формуле Перлина, подставим в неё значения 1-го перехода:

$$\sigma_{T1} = \sigma_{02 \text{ пред}} = 350 \text{ МПа},$$

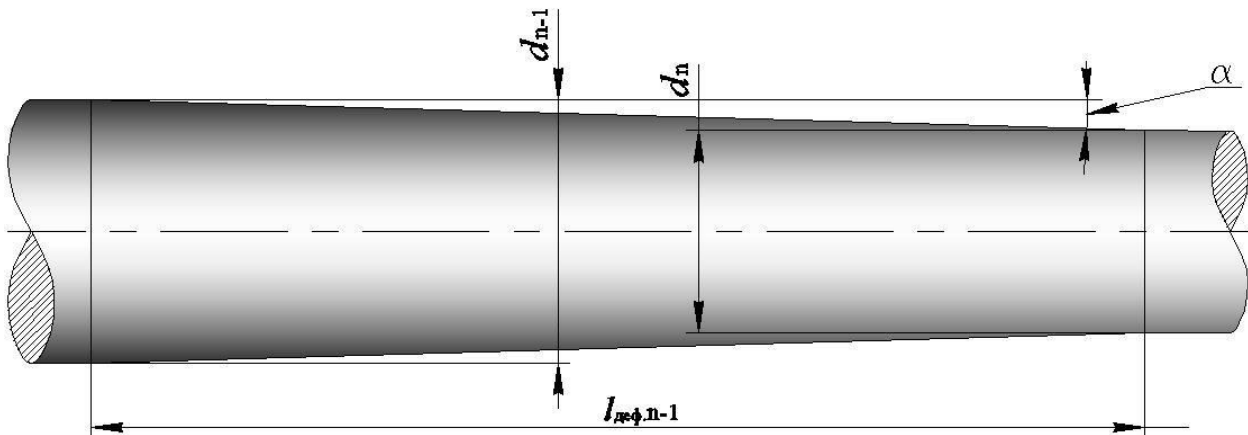
что выглядит неубедительно.

**8. Вывод:** для прямоточного волочения формула (1) Перлина сложна и некорректна, она содержит большое число различных коэффициентов и иных параметров, хотя и достаточно обоснованных теоретически, но с возможным накоплением ошибок и др. неточностей. Она для прямоточного волочения недостаточно обоснована, поскольку напряжённо-деформируемое состояние в данном случае слишком простое и должно стать «классическим». Понятие «критическое противонапряжение» не имеет явной физической природы и достаточного технического обоснования. Поэтому будем решать такую задачу другими, более подходящими способами.

**9.** Рассмотрев условия равновесия передельной проволоки в 1-м и всех последующих переходах, получим прямоточный процесс: усилие  $P_n$  волочения и противонапряжение  $Q_n$  – полезные для деформации растяжения передельной проволоки. Неполезная нагрузка – силы, обусловленные деформациями сдвига, вызванные углом конусности волочильного канала и силами трения. В критическом противонапряжении нет смысла. Предел текучести от перехода к переходу возрастает из-за деформационного упрочнения. Для нахождения сил волочения и противонапряжений на всех переходах будем каждый раз его искать [3].

**10.** Для этого сделаем разумное предположение, что в лабораторном волочильном стане для многократного прямоточного волочения будет применён волочильный инструмент с гидродинамическим захватом и нагнетанием технологической смазки в деформационную зону. Его предполагаемая конструкция уже известна, т.к. патентная заявка для её защиты как интеллектуальной собственности уже почти готова. Усреднённый продольный профиль рабочего

канала такого волочильного инструмента показан на рис. 2. Зона деформации – усечённый конус, большее основание – начальный диаметр  $d_{n-1}$  передельной проволоки, меньшее – конечный диаметр  $d_n$  передельной проволоки для перехода  $n$ , высота усечённого конуса – длина  $l_n$  зоны деформации.



**Рис. 2. Усреднённый продольный профиль рабочего канала принятого волочильного инструмента с гидродинамическим захватом и нагнетанием технологической смазки в зону деформации:  $d_{n-1}$  - начальный диаметр передельной проволоки на данном переходе;  $d_n$  - конечный диаметр передельной проволоки;  $l_n$  - длина деформационной зоны данного ( $n$ ) перехода.**

**11.** Приведём в порядок исходные данные (табл. 1), чтобы дать зависимость между единицами измерения СГС [3] и СИ:

$$1 \text{ кг/мм}^2 \approx 10 \text{ МПа}; \quad 1 \text{ МПа} \approx 0,1 \text{ кг/мм}^2.$$

Кроме того, нужно найти связь между степенью  $\varepsilon_n$  деформации и деформациями при волочении (обжатие  $\delta_n$ , вытяжка  $\mu_n$ , удлинение  $\lambda_n$ ). Так, степень  $\varepsilon_n$  деформации за переход, применяемая при прокатке, показывает, во сколько раз увеличивается или уменьшается размер образца. Из перечисленных выше величин такое определение более соответствует относительной вытяжке  $\mu_n$ , т.е.  $\varepsilon_n = \mu_n$ , и  $\mu_n = \lambda_n + 1$  [4, с. 13].

**12.** Итак, исходный предел текучести  $\sigma_{02(0)} = 38 \text{ кг/мм}^2$  [3, с.109, табл. 8]. Конечный предел текучести (условный)  $\sigma_{02(5)}$  при  $\varepsilon_n = \mu_n = 13$  имеется в [3, с. 117, рис. 146] и там же имеется формула  $\sigma_{02} = 37,5 + 3,16 \varepsilon^{0,64}$  (кг/мм<sup>2</sup>). По ней можно определить предел текучести  $\sigma_{02}$  при больших деформациях. Если  $\varepsilon_n = 13$ , то  $\sigma_{02} = 37,5 + 3,16 \cdot 13^{0,64}$  (кг/мм<sup>2</sup>) = 52,84 кг/мм<sup>2</sup>. Переведя в систему СИ, получим:  $\sigma_{02(5)} = 528,4 \text{ МПа}$ .

13. Аналогичным образом, по частным  $\mu_n$  и суммарным  $\mu_{n\Sigma}$  вытяжкам определим условные пределы текучести  $\sigma_{02(n)}$  для всех переходов и снова поместим их в аналогичную таблицу 2.

Т а б л и ц а 2. Условные пределы текучести  $\sigma_{02(n)}$  для всех переходов.

Переходы:	0	1	2	3	4	5
Частные вытяжки, $\mu_n$	1	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671
Суммарные вытяжки, $\mu_{n\Sigma}$ , ( $\varepsilon_{n\Sigma}$ )	1	1,671	2,792	4,666	7,797	13,03
Условные пределы текучести, $\sigma_{T(n)}$ , МПа	406,6	419,9	436,0	459,7	492,6	528,4

14. Условие пластичности [2, (II-9), с.36] соблюдается в любой точке зоны деформации (рис. 3), поскольку доподлинно известно, что эта пластическая деформация там происходит. Сумма модулей продольных напряжений растяжения и радиальных напряжений сжатия составляет предел текучести:

$$\sigma_{l(n)} + \sigma_{r(n)} = \sigma_{T(n)}.$$

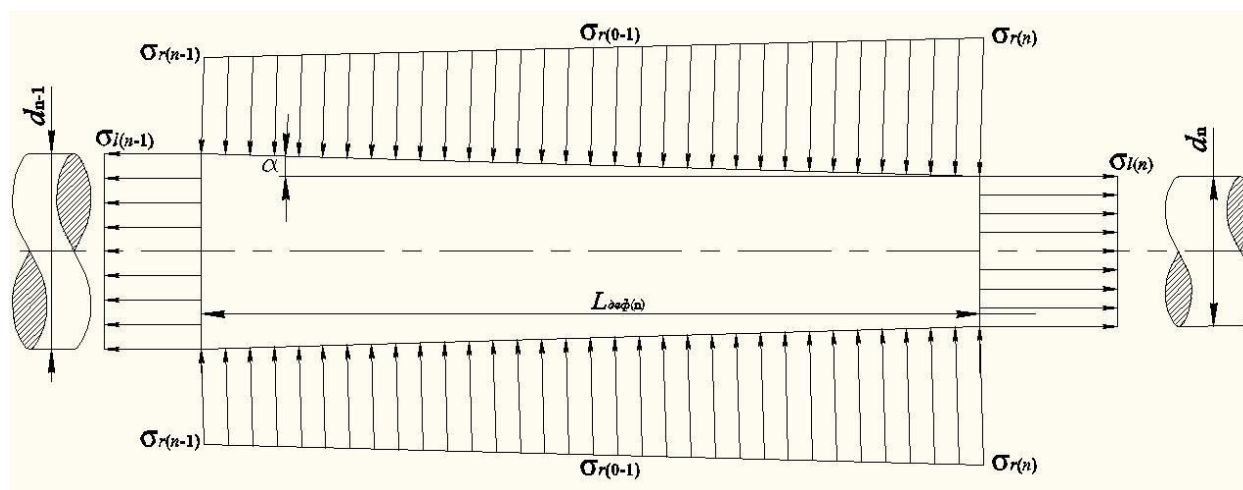


Рис. 3. Распределение нагрузок на металл деформационной зоны.

15. Нагрузки на металл распределены по зоне деформации (рис. 3). Хотя радиальные напряжения по длине зоны деформации изменяются линейно, среднее между начальным и конечным пределами текучести будем определять как среднее геометрическое. Изменения продольных напряжений растяжения по радиусу сечения учитывать не будем, поскольку это вызывает напряжения сдвига, искривляющие поперечные сечения проволоки. Но прямоточное волочение происходит без их влияния. Поскольку коэффициент трения очень мал, и угол конусности зоны деформации невелик ( $\alpha = 0,31^\circ$ ).

16. Теперь найдём усилия  $P_n$  протяжки передельной проволоки через каждый из 5-ти переходов. Пределы текучести  $\sigma_{T(n)}$  для каждого перехода при-

введены в 4-й строке табл. 2. Оставим обозначение  $\sigma_{02}$  для исходной катанки, а пределы текучести для др. переходов обозначим как  $\sigma_{T(n)}$ . Итак, из табл. 2 берём пределы текучести для каждого перехода. Составим частное уравнение равновесия для 1-го и для остальных переходов.

Для 1-го перехода усилие противонатяжения составит:

$$Q_{(1)} = \sigma_{l(0)} \cdot \pi \frac{d_{(0)}^2}{4}.$$

Усилие протяжки:

$$P_{(1)} = \sigma_{l(1)} \cdot \pi \frac{d_{(1)}^2}{4}.$$

Продольная составляющая нормальной реакции волоочильного канала (часть сопротивления протяжке):

$$R_{l(1)} = S_{K(1)} (\sigma_{r(0-1)} \cos \alpha + \sigma_{\text{тр}}).$$

Здесь  $\sigma_{r(0-1)}$  – среднее геометрическое начального  $\sigma_{r(0)}$  и конечного  $\sigma_{r(1)}$  пределов текучести 1-го перехода:

$$\sigma_{r(0-1)} = \sqrt{\sigma_{r(0)} \cdot \sigma_{r(1)}}.$$

По этому напряжению вычислим и добавим напряжение трения (продольная проекция напряжения трения в волоочильном канале). Согласно [5], гидродинамическое трение при волочении составляет менее 0,01.

Площадь боковой поверхности канала:

$$S_{K(1)} = 0,5 \cdot \pi (d_{(0)} + d_{(1)}) L_{(1)},$$

где  $L_{(1)} = 90$  мм - длина зоны деформации канала волоочильного инструмента для 1-го перехода (высота усечённого конуса, что будет показано далее).

Отсюда получим:

$$\sigma_{r(0-1)} = \sqrt{406,6 \cdot 419,9} = 413,2 \text{ (МПа)}.$$

Подставляя,

$$S_{K(1)} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot (6,5 + 4,993) \cdot 90 = 1\,624 \text{ мм}^2 = 0,001624 \text{ м}^2.$$

Предварительно определим:

$$\cos \alpha = \cos 0,31^\circ = 0,00541.$$



Среднее нормальное давление смазки в зоне деформации соответствует среднему пределу текучести. Среднее напряжение трения составит 4,13 МПа (максимум).

Продольная проекция реакции волоочильного инструмента составит:

$$R_{l(1)} = 0,001624 \cdot (413,2 \cdot 0,00541 + 4,13) = 0,001624 \cdot 6,365 = 10,3 \text{ (кН)}.$$

Для лучшего представления переведем эту силу СГС:  $\approx 1\ 033$  кгс, что довольно много.

Частное уравнение равновесия для 1-го перехода:

$$Q_{(1)} + R_{l(1)} + F_{(0)} = P_{(1)} + F_{(1)},$$

где слева – пассивные силы (тормозящие), справа – активные (инициирующие) усилия.

Показанное на рис. 1 направляющее противонатяжение для 0-го барабана учитывать не будем, т.к. оно вызвано незначительным усилием размотки катанки. Для 1-го перехода усилие  $Q_{(1)}$  противонатяжения будет задано сечением катанки  $d_0$  в состоянии металла, близком к исходному пределу текучести:

$$\sigma_{т(1)} = \sigma_{02(1)} = 406,6 \text{ (МПа)}.$$

С другой стороны, противонатяжение для 1-го перехода:

$$Q_{l(1)} = \frac{M_0}{D_0} = -F_0.$$

Здесь  $M_0$  – крутящий момент на шпинделе 0-го барабана;

$D_0$  – диаметр того же барабана; поэтому  $\sigma_{l(1)} = \frac{4F_0}{\pi d_0^2}$ , и, согласно

условию пластичности,  $\sigma_{02} = \sigma_{r(0)} + \sigma_{l(0)}$ ,

откуда, учтя, что  $\sigma_{r(0)}$  – сжимающее напряжение, то из упрощённого уравнения равновесия

$$F_{(0)} = P_{(1)} + F_{(1)} - Q_{(1)} + R_{l(1)},$$

и можно получить результат.

Но, уходя от чрезмерного количества недостаточно обоснованных предположений, мы приходим к тому же.

Таким образом, намечен возможный путь подхода к динамическому моделированию. При определении необходимой мощности, затрачиваемой на протяжку передельной проволоки, и при подборе марки общего для всего волочильного стана приводного асинхронного электродвигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором, должна быть экономия по многим, если не по всем возможным статьям.

Далее следует завершить данное не слишком удачное исследование, отметив, что здесь выполнена подготовка к динамическому моделированию прямоточного волочения. Необходимо наметить способы выполнения стоящих перед нами задач.

## **§ 2. Разработка методики механического моделирования технологии грубо-среднего волочения проволоки на прямоточном волочильном стане с шасси грузового автомобиля в качестве привода**

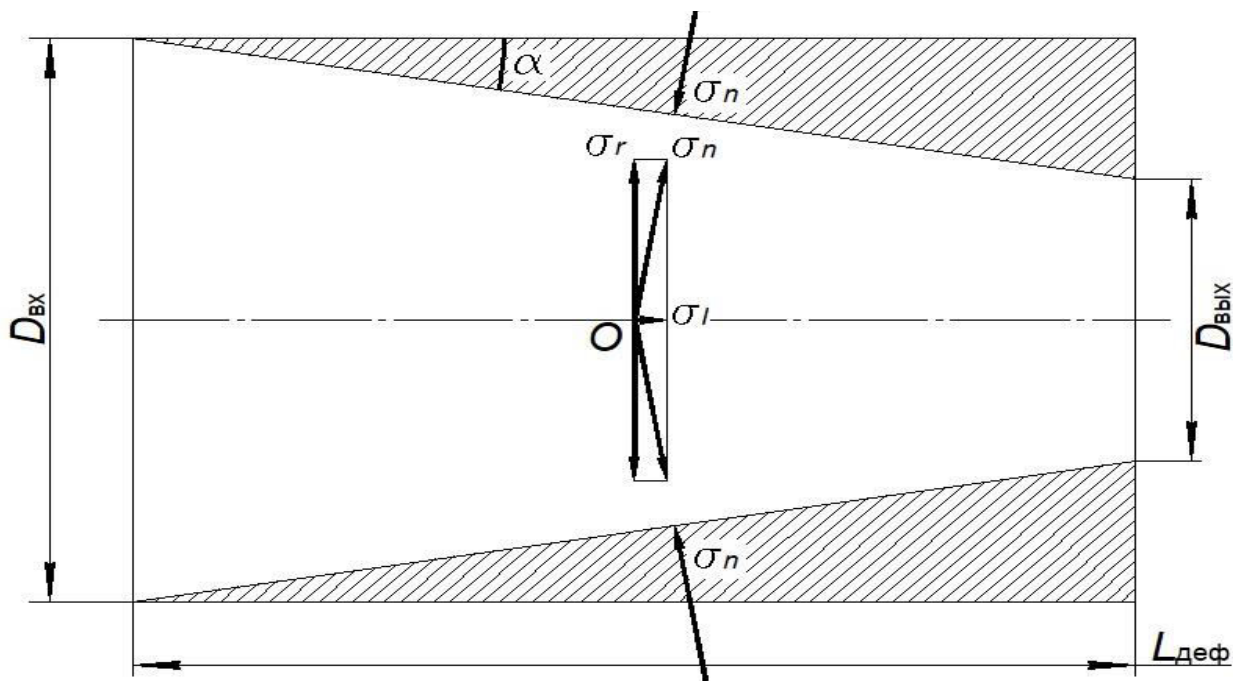
Принятый метод динамического моделирования процесса грубо-среднего волочения должен, таким образом, заключаться в рассмотрении напряжённо-деформированного состояния металла в деформационной зоне прямоточного волочения очевидными методами теории пластических деформаций. Это даст простоту, после чего для решения стоящей задачи необходимо правильно применить известное [2] условие пластичности, что и даст зависимость силы волочения от кинематических параметров – вытяжки (обжатия) и геометрии деформационной зоны. При этом необходимо учитывать специфику процесса прямоточного волочения, то есть, кроме основных признаков, характерных для прямоточного процесса (многократность, равенство крутящих моментов на шпинделях барабанов), будет иметь место единство секундных объёмов металла проволоки в любом месте. Прямоточное волочение можно оправдать лишь в случае эффективного противонатяжения на всех переходах, заметного снижения коэффициента контактного трения в зонах деформации.

Сначала считалось, что после кинематического моделирования следует динамическое, то есть логичным будет, если видимая картина прямоточного волочения каким-то образом зависит от силовых причин, то есть динамики

этого процесса. Сейчас представления такие: кинематическое моделирование даёт лишь примерную, ориентировочную картину процесса, а последующее динамическое моделирование в чистом виде невозможно, ведь рассмотрение динамики должно влиять на кинематическую картину, например, изменением общей схемы процесса или компоновки оборудования. Таким образом, это не «динамическое», а «плюс-динамическое», «механическое» моделирование.

К тому же, термин «динамический» обычно предполагает рассмотрение некоторого процесса с обязательным наличием инерциальных сил. В нашем же случае инерционные силы могут рассматриваться лишь при достижении размерами элементов и скоростями их деформаций планетарного масштаба.

Главный вопрос, открывающийся в таком моделировании, есть баланс: «**продольные напряжения растяжения – радиальные напряжения сжатия**» в зоне деформации. Решим его, используя понятие «условие пластичности», оценив его как указанный баланс при данном значении полного напряжения текучести, которое возрастает от перехода к переходу. Для этого рассмотрим металл проволоки в деформационной зоне волочильного инструмента как расклинивание этим металлом данного волочильного инструмента (рис. 4).



**Рис. 4. Поведение металла проволоки в зоне деформации волочильного инструмента:**  $D_{вх}$  - входной диаметр деформационной зоны;  $D_{вых}$  - выходной диаметр деформационной зоны;  $\sigma_n$  - нормальное напряжение сжатия;  $\sigma_r$  - радиальное напряжение сжатия;  $\sigma_l$  - продольное напряжение растяжения.

Представленное изображение деформационной зоны показывает, что в продольном сечении зоны на металл действует радиальное сжимающее напряжение  $\sigma_n$ , действующее нормально к поверхности канала волоочильного инструмента. Рассмотрим точку  $O$  на оси канала. Это напряжение можно разложить на радиальное  $\sigma_r$  сжимающее и продольное  $\sigma_l$  растягивающее. Они действуют в деформационной зоне. По условию пластичности баланс между этими напряжениями зависит от угла конусности  $\alpha$  волоочильного канала.

При особой конструкции волоочильного инструмента это должен быть средний угол. Если мы рассматриваем механику прямоточного волочения, характерную гидродинамическим захватом и нагнетанием технологической смазки в зону деформации так, что коэффициент трения становится низким.

Для подходящего угла  $\alpha$  конусности используем волоочильный узел из почти готовой патентной заявки. Авторы подадут заявку в ФИПС на волоочильный инструмент для промежуточных переходов при грубо-среднем волочении проволоки.

Рассмотрев и проанализировав эту конструкцию, видим, что деформация происходит, по меньшей мере, в рабочих секциях волоочильного инструмента. Они отличаются от напорных секций тем, что их диаметр меньше диаметра входящей проволоки-заготовки. В заявке логически доказано, что рабочих волок в секции должно быть 3, не больше и не меньше, хотя деформационная зона может распространяться и в напорные секции, где некоторые условия могут приводить к деформированию проволоки только под давлением смазки. Мы специфические условия учитывать не будем, пусть они идут в плюс.

Согласно стандартам, длина каждой секции, состоящей из калибрующих волок, 45 мм, длина всей рабочей зоны 135 мм. Отсюда нужно вычесть 20 мм на входную и приблизительно 10 мм на выходную зону секции, что в итоге даст длину зоны деформации 105 мм. Это – большой катет прямоугольного треугольника. С другой стороны, если исходный диаметр катанки 6,5 мм, а конечный диаметр – при максимально возможном обжати (в обычных условиях 0,41) – 5 мм, их полу-разность

$$0,5 (6,5 - 5,0) = 0,75 \text{ мм.}$$

Это – меньший катет прямоугольного треугольника. Если отношение меньшего катета к большему есть в данном случае  $\text{tg } \alpha$ , тогда

$$\alpha = \text{arctg} (0,75/105,0) = \text{arctg} (0,007143) = 0,4093^\circ.$$

Но это – только 1-й переход (6,5 → 5,0). Будем считать, что 2-ой и последующие переходы будут иметь тот же угол  $\alpha$  в волочильных инструментах, т.е. диаметры всех секций пропорциональны диаметрам проволоки.

Рассмотрим прямоугольный треугольник, составленный векторами  $\sigma_r$ ,  $\sigma_l$  и  $\sigma_n$ . Если угол  $\alpha$  напротив катета  $\sigma_l$ , отношение катетов  $\sigma_l / \sigma_r = \text{tg } \alpha$ . Вследствие малости угла  $\alpha$  надо стараться, чтобы радиальное напряжение  $\sigma_r$  сжатия достигало бы значений, очень близких к напряжению  $\sigma_n$  нормального давления технологической смазки в таком волочильном инструменте.

Дополнительно известно: в деформационной зоне деформация происходит, и, следовательно, обязательно выполняется условие пластичности. Его суть: арифметическая сумма радиального напряжения  $\sigma_r$  сжатия и продольного напряжения  $\sigma_l$  растяжения равна текущему значению предела текучести  $\sigma_{02}$  металла передельной проволоки. Он увеличивается от перехода к переходу, не переходя предела, когда нужен восстанавливающий пластичность отжиг для дальнейшего волочения тонкой проволоки по совсем другой технологии.

Для прослеживания изменений предела текучести  $\sigma_{02}$  будем обращаться к справочнику А.В. Третьякова [3] для анализа хода упрочнения стали 20. Эта сталь была выбрана в предыдущих публикациях из-за её актуальности в производстве метизов и из-за того, что она не является высокоуглеродистой, в прямоточном волочении которой для последующего изготовления из неё стальных канатов накоплен очень большой опыт.

Из [6] воспользуемся готовыми данными по кинематике волочильного стана, подлежащего динамическому моделированию, а именно, таблицей 3.

Т а б л и ц а 3. Результаты механического моделирования для всех переходов.

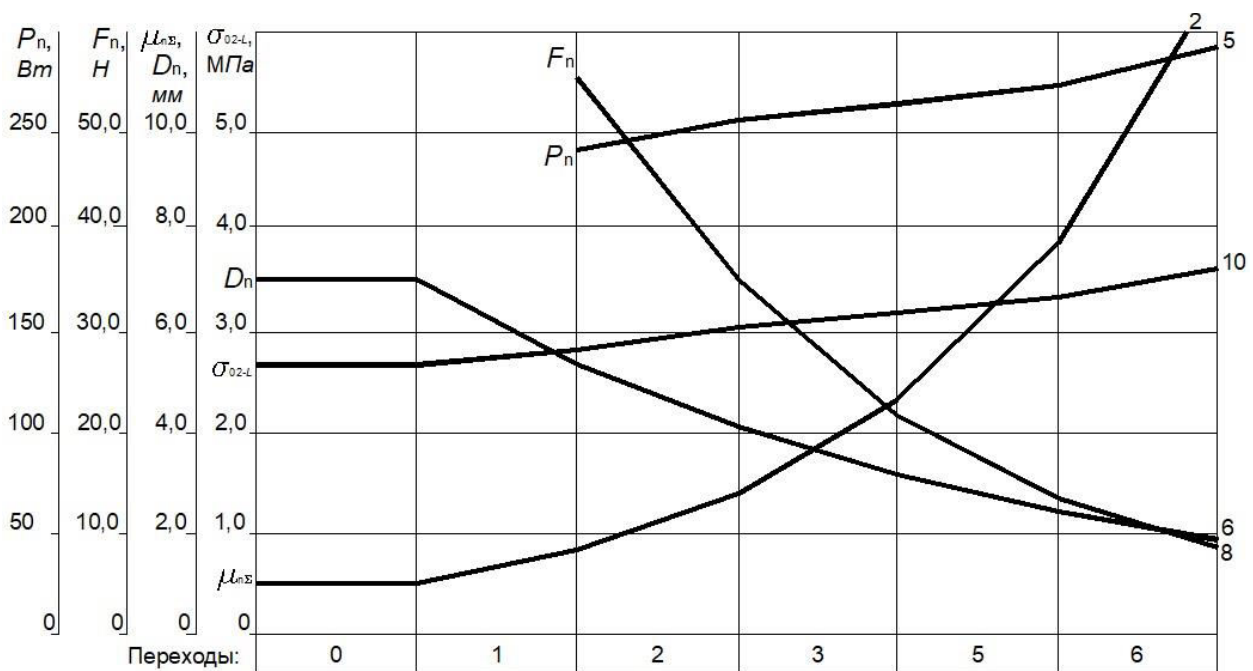
Переходы:		0	1	2	3	4	5
1	Частные вытяжки, $\mu_n$	1	1,671	1,671	1,671	1,671	1,671
2	Суммарные вытяжки, $\mu_{n\Sigma}$ , ( $\epsilon_{n\Sigma}$ )	1	1,671	2,792	4,666	7,797	13,03
3	Диаметры проволоки, $d_n$ , мм	6,5	4,993	3,835	2,946	2,263	1,738
4	Условн. пределы текуч., $\sigma_{02(n)}$ , МПа	375,0	419,9	436,0	459,7	492,6	528,4
5	Ср. пределы текучести, $\sigma_{ср.п.}$ , МПа	375,0	396,8	427,9	447,7	469,6	510,2
6	Прод. составляющ., $0,007 \sigma_{ср.п.}$ , МПа	2,679	2,834	3,056	3,197	3,354	3,644
7	Площади сечений, $S$ , $10^{-6} \text{ м}^2$	33,18	19,58	11,55	6,816	4,022	2,372
8	Усилия волочения, $F_n$ , Н	-	55,48	35,30	21,79	13,49	8,643
9	Скорости протяжки, $v_n$ , м/с	2,6	4,345	7,260	12,13	20,27	33,87
10	Мощности на переходах, $P_n$ , Вт	-	241,1	256,3	264,3	273,4	292,7

В табл. 3 приведены данные по изменению условного предела текучести ст. 20 от перехода к переходу при 5-кратном волочении (строка 3 [3]) и при частных вытяжках  $\mu_n = 1,671$  (строки 1 и 2, а также 3 данной таблицы 3).

В справочнике [3] в имеющуюся под диаграммой для стали 20 (с. 117) формулу  $\sigma_{02} = 37,5 + 3,16 (\epsilon_{n\Sigma})^{0,64}$  подставим 0 и получим предел текучести катанки  $\sigma_{02} = 37,5 \text{ кг/мм}^2$ , и, переводя в систему СИ, получим  $\sigma_{02} = 375 \text{ МПа}$ , и так далее, для каждого из переходов (см. строку 4 таблицы 3).

Проследим изменение (возрастание) условного предела  $\sigma_{02}$  текучести по переходам (рис. 5). Условный предел текучести исходной заготовки (катанки)  $\sigma_{02} = 375 \text{ МПа}$ . Это значит, что наблюдается возрастание в течение 1-го перехода предела текучести от 375 до 419,9 МПа. В качестве среднего значения  $\sigma_{ср.1}$  за 1-й переход необходимо выбрать среднее геометрическое начального и конечного пределов текучести [7], квадратный корень из произведения этих величин, 396,8. Аналогично, за 2-й переход предел текучести возрастает от 419,9 до 436,0 МПа, среднее геометрическое равен 427,9 МПа, и так далее (строка 5). Среднее геометрическое всегда несколько меньше, чем среднее арифметическое (полу-сумма) этих величин.

Теперь, когда мы знаем предельные напряжения в сечениях передельной проволоки на каждом переходе, используем условие пластичности. Предел пластической текучести – это с таким напряжением происходит деформация простого одноосного растяжения передельной проволоки текущего диаметра на каждом переходе. Угол  $\alpha$  соответствует каждому переходу.



**Рис. 5. Графическая иллюстрация результатов механического моделирования в таб. 1:** слева графика – моделируемый параметр; справа – № строки таблицы;  $\mu_{н\Sigma}$  – суммарная вытяжка;  $d_n$  – диаметры проволоки;  $\sigma_{ср.L.n}$  – продольная составляющая средних пределов текучести по переходам;  $F_n$  – усилия волочения после каждого перехода;  $P_n$  – мощности деформации на каждом переходе.

Напряжение текучести в соответствии с условием пластичности может быть разложено на радиальное  $\sigma_r$  и на продольное  $\sigma_l$  напряжения. Они, в свою очередь, для каждого перехода связаны между собой:  $\sigma_l/\sigma_r = \text{tg } \alpha$ , то есть  $\sigma_l/\sigma_r = 0,007143$ .

Следовательно, продольное напряжение (на него идут затраты энергии, оно «активное») есть малая доля (0,007143) от полного предела текучести (строка 6), а  $\sigma_r$  — вся оставшаяся доля полного предела текучести. Это — «пассивное» напряжение, оно диктуется твёрдостью и прочностью волочильного инструмента, оно обеспечено без затрат энергии.

Чтобы получить полные усилия волочения, продольные напряжения растяжения нужно умножить на площади поперечных сечений проволоки. По текущему диаметру определим площади поперечных сечений на каждом переходе (строка 7). Умножив их на средние напряжения текучести, получим усилия, затраченные на каждый переход (строка 8). Возьмём [6] и добавим в табл. 3 строку 9: «Скорости протяжки» и произведём все необходимые действия. Необходимо учесть: 0-й «переход» обеспечивает усилие противо-

натяжения для 1-го перехода, деформации здесь нет, и начальная, и конечная, и средняя скорости протяжки равны 2,6 м/с, и затрат энергии на 0-м переходе тоже нет.

На рис. 5 показано возрастание продольной составляющей условного предела текучести передельной проволоки на всех 5-ти переходах (включая и 0-й, т.е. 6-й). На график можно смотреть и как на эпюру продольных напряжений растяжения передельной проволоки. Остальные участки проволоки, кроме деформационных зон, из этой эпюры исключены.

Естественно, для каждого перехода будем получать усилия волочения, перемножая среднее геометрическое продольных составляющих текущего значения предела текучести металла передельной проволоки с поперечными сечениями этой проволоки на каждом соответствующем переходе. Заметим, усилия выходят гораздо меньшими, чем в [6], они измеряются в Ньютонах.

Умножив усилия волочения на каждом переходе на скорости протяжки на этих переходах, получим мощности, затрачиваемые приводом на каждый переход, и поместим результаты в строку 10 табл. 3. Наконец, сложив все эти мощности, получим полную мощность, идущую от привода на результат – суммарное деформирование металла проволоки при прямоточном волочении. Эта мощность, учтённая без потерь на трение в механизмах и на барабанах, (мощность «нетто»), составила всего 1,328 кВт. В [8] после кинематического моделирования грубо-среднего прямоточного волочения мы оценили, хотя и не по правилам, суммарную мощность, идущую на прямоточное грубо-среднее волочение. Было выполнено только кинематическое моделирование привода. Необходимые динамические параметры брались по ожидаемым лучшим значениям. Итак, если мощность привода в [8] составила 200 кВт, то в этой работе снижение потребляемой приводом энергии составило лишь 0,1614 %. Здесь не принималось никаких допущений, выводящих результат на более низкий уровень достоверности. Разрабатываемую технологию с полнейшей уверенностью можно называть энергосберегающей.



### **§ 3. Окончательный подбор мощности, частоты вращения и марки приводного асинхронного электродвигателя переменного тока**

Теперь следует найти мощность приводного двигателя и подобрать его тип и марку. Тип – самый выгодный и желательный – асинхронный. Марку электродвигателя определим из данных интернета. Но, поскольку мощность «нетто» является «смешной», правила учёта потерь энергии, различные коэффициенты учитывать также не будем. Перво-наперво, округлив расход энергии на деформацию на каждом переходе в большую сторону, получим 2,0 кВт. Теперь, увеличив эту величину в 5 раз, получим 10 кВт. Эта мощность учтёт даже все непредвиденные потери энергии. Марка двигателя – 4 AM132 M2, его мощность составляет 11 кВт, синхронная частота вращения его вала - 3000 об/мин, что максимально возможно и ближе всего к числу оборотов автомобильного двигателя внутреннего сгорания.

#### **Дальнейшее совершенствование динамического моделирования прямоточного волочения (подведение итогов)**

Рассмотрение отображённой в статье сделанной работы показало, что в ряде уравнений равновесия, являющихся системой, общий вид которой представлен уравнением (1), описываются все 5-ть переходов. Незвестных в каждом уравнении системы – 4-ре (исключая задаваемые параметры), и эти 4-ре вида уравнений для каждого из 5-ти переходов в итоге дают 20 отдельных уравнений. Уравнение (1) шифрует 4-ре для каждого перехода.

Далее сделан вывод, что формула Перлина слишком сложна, она имеет много сокращающих запись формулы обозначений, а понятие «критическое противонатяжение» вообще недостаточно адекватно, т.к. не имеет явной физической природы и достаточно обоснованного технического смысла.

Отслеживая деформационное упрочнение от перехода к переходу, мы использовали справочник Третьякова А.В. Там, по частным  $\mu_n$  и суммарным  $\mu_{n\Sigma}$  вытяжкам определяли условные пределы текучести  $\sigma_{02(n)}$  для всех переходов. При определении необходимой мощности, затрачиваемой на протяжку передельной проволоки, и при подборе марки общего для всего волочильного

стана приводного асинхронного электродвигателя переменного тока с короткозамкнутым ротором, должна быть экономия по многим, если не по всем возможным статьям капитальных затрат и пр. расходов.

Рассмотрено напряжённо-деформированное состояние металла в деформационной зоне прямоточного волочения с использованием очевидных методов теории пластических деформаций. Прямоточное волочение должно себя оправдывать лишь в случае эффективного действия противонатяжения на каждом переходе, включая 1-й. Для полноты картины деформации вытяжки должно также наблюдаться значительное снижение коэффициента контактного трения в деформационной зоне волочильного инструмента.

Сначала считалось, что после кинематического моделирования следует динамическое, т.е. будет логичным, если прямоточное волочение каким-то образом зависит от силовых причин, т.е. динамики этого процесса. Кинематическое моделирование даёт лишь примерную, ориентировочную картину, а последующее динамическое моделирование в чистом виде невозможно, ведь при рассмотрении влияния динамики она должна влиять на кинематику, например, изменением общей схемы процесса или компоновки прямоточного волочильного стана, это будет не «динамическое», а уже «+-динамическое», или просто «механическое» моделирование.

Марка единого для прямоточного волочильного стана электродвигателя – 4 АМ132 М2, его мощность составляет 11 кВт, что является «смешным». Отсюда главное – формула И.Л. Перлина и все остальные – они достаточно «искусственные», чтобы адекватно применяться таком моделировании. Прямоточное волочение – процесс настолько передовой, что его можно верно охарактеризовать, рассмотрев напряжённо-деформированное состояние металла в деформационной зоне волочильного инструмента, у которого углом конусности рабочего канала и коэффициентом трения можно пренебречь.

Полученная интерпретация результатов механического моделирования процесса грубо-среднего прямоточного волочения опровергает то мнение, что «устоявшееся» разделение технологий волочения на «толстое (грубое)»,

«среднее» и «тонкое» волочение является окончательным и бесповоротным. Результаты подтверждают, что, например, прямоточная технология грубо-среднего волочения ещё имеет огромный потенциал для совершенствования, как, впрочем, и др. технологии, имеющие характерные различия в диаметрах.

#### **Список литературы:**

1. Кузнецов С.А., Соловьёв К.А., Морошкин А.С. и Заплатина Е.А. Подготовка методики динамического моделирования волочильного стана прямоточного типа с автомобильной трансмиссией в качестве привода. Прорывные научные исследования как двигатель науки: сборник статей Международной научно-практической конференции (4.12.2018 г, г. Магнитогорск). В 3-х ч; ч. 3/ - Уфа: МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2018, 290с.
2. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. 2-е изд., М.: Metallurgy, 1971. -448с.
3. Третьяков А.В., Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. -Изд. 2-е, М.: Metallurgy, 1973.
4. Кузнецов С.А., Земсков А.В. Моделирование поведения сыпучей среды в установке абразивно-порошковой очистки катанки от окалины. Сталь, № 9, М.: Metallurgy, 2005, с.56-58.
5. Кузнецов С.А. и Виноградов А.И. Теория волочения и прессования – лабораторный практикум. Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ.- Череповец: ЧГУ, 1998.
6. Кузнецов С.А., Соловьёв К.А. и Морошкин А.С. Возможные подходы к динамическому моделированию прямоточного волочения проволоки грубо-средних сечений. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции «Прорывные научные исследования как двигатель науки», г. Тюмень, 26.04.2019.
7. С.А. Кузнецов, А.И. Виноградов. Теория волочения и прессования. Учебно-методическое пособие по выполнению практических занятий. Череповец: ЧГУ, 2001, 21с.

8. Кузнецов С.А. Кинематическое моделирование многократного волочильного стана прямоточного типа с автомобильной трансмиссией в качестве привода. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции «Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы», РФ, г. Новосибирск, 04.06.2018, Стерлитамак: АМИ, 16с, с 60.

© Кузнецов Сергей Александрович.