

Подстановка (17), (18) в (14) с учетом  $\frac{2}{d} - 1 = \frac{2}{4-e} - 1 = -\frac{1}{2} + \frac{1}{8}e + O(e)$  приводит к достаточно громоздким выкладкам, поэтому в работе дальнейший расчет проводится не будет.

Таким образом, в работе продемонстрирована процедура расчета петлевых интегралов методом размерной регуляризации с использованием методики параметризации Фейнмана – объединения пропагаторов в один знаменатель. Полученные в работе соотношения могут быть использованы для расчета поправок к вершинным функциям, а также вычисления других одночастично неприводимых диаграмм.

#### Литература

1. Пенскин, М. Введение в квантовую теорию поля / М. Пенскин, Д. Шредер. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 784 с.
2. Казаков, Д. И. Радиационные поправки, расходимости, регуляризация / Д. И. Казаков. — Дубна : ОИЯИ. – 2008. – 93 с.
3. Romao, J. C. Modern techniques for one-loop calculation / J. C. Romao. – Portugal : Departamento de Fisica, Instituto Superior Tecnico, 2004. – 81 p.

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВЕННЫХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МАРШРУТА ВОЛОЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

А. Р. Рахматулаев

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

Научный руководитель С. И. Прач

*Волочение проволоки является широко распространенным процессом обработки металлов давлением, при котором происходит постепенное уменьшение поперечного сечения исходной заготовки путем ее многократного протягивания через специальный инструмент – волоку. Однако одна из основных проблем при волочении тонкой проволоки – снижение ее прочности и пластичности, что приводит к обрывам. Это обусловлено высокой температурой на поверхности проволоки в результате деформационного старения, которое снижает качество проволоки [1, 2]. Предлагаемая методика оценки качества проволоки позволяет оптимизировать действующие и разрабатывать новые маршруты волочения с целью повышения качества проволоки, а также производительности волочения без потери качества.*

**Ключевые слова:** маршрут волочения, волока, оптимизация, проволока, качество проволоки, пластичность, производительность.

Методика оценки качества проволоки основана на связи между качеством готовой высокоуглеродистой проволоки и ее состоянием в процессе волочения [3].

С помощью этой методики можно оптимизировать существующие маршруты волочения и разрабатывать новые с целью повышения качества проволоки и увеличения производительности без потери качества. Она учитывает механические свойства и содержание углерода в проволочной заготовке, особенности волочительных станков и определяет критические режимы, которые могут повлиять на качество проволоки.

Методика основана на расчете новых маршрутов волочения или алгоритмов расчета режимов «тонкого» волочения, которые позволяют улучшить технологичность и сохранить нормальные режимы волочения при изготовлении металлокорда из проволоки.

Построение маршрута «тонкого» волочения с помощью предлагаемой методики основано на расчете промежуточных диаметров волок, чтобы достичь максимальной скорости волочения без потери качества проволоки и сохранения устойчивого режима волочения. Основные этапы разработанной методики включают следующее:

1. Задаем исходные данные: волочильное оборудование: волочильный стан «тонкого» волочения; диаметр проволоки начальный с плюсовым допуском заводской  $d_0$ , мм; диаметр проволоки конечный с минусовым допуском  $d_k$ , мм; временное сопротивление разрыву заводской проволочной заготовки  $\sigma_{в0}$ , МПа; предел прочности готовой проволоки  $\sigma$ , МПа; паспортная максимальная скорость проволоки на выходе из волочильного стана  $V_k$ , м/с; полуугол конической рабочей зоны волоки  $\alpha$ , град; температура ванны СОЖ  $t_0$ , °С; напряжение противонапряжения проволоки на входе в волочильный стан  $\sigma_{в0}$ , МПа; максимальное конструктивно возможное количество волок (без учета сдвоенных волок):  $m$ ; мощность двигателя привода волочильного стана,  $N_{\text{паспорт}}$ , кВт; коэффициент полезного действия привода волочильного стана  $\eta$ ; коэффициент контактного трения в волоке  $f$ ; паспортные кинематические вытяжки ( $\mu_i$ ) для  $m$  волок; содержание углерода в проволоке в относительных единицах  $c$ ; коэффициенты износа волок  $\beta = 0,01-0,05$ ; число витков проволоки на тяговом шкиве  $v_{si}$ ; коэффициент трения скольжения между поверхностями проволоки и тяговых шкивов  $f_s$ ; номера волок, в которых устанавливаются сдвоенные  $v_i$ ; соотношение диаметров в сдвоенных волокнах  $y_i$ ; диаметры тяговых шайб  $D_{ni}$ .

2. Расчет деформационно-кинематических параметров волочения: диаметр проволочной заготовки для тонкого волочения; суммарная фактическая вытяжка; частные вытяжки; коэффициент износа; скорости волочения проволоки, м/с; линейные скорости вращения тяговых шайб, м/с; величины относительного скольжения; диаметры волок, мм; пределы прочности проволоки, МПа; средняя температура сечения проволоки и температура поверхности проволоки, °С; средняя температура поверхности проволоки:

$$t_{n_i} = t_{oi} + 0,3 \cdot \sigma_{b_i} \left( 1 - \frac{1}{\mu_i} \right) + 2,75 \cdot \sigma_{b_i} \sqrt{V_i \cdot d_i \cdot 10^{-3}}. \quad (1)$$

3. Все параметры, рассчитанные в п. 2, должны находиться в допустимых пределах, заданных техническими характеристиками волочильного оборудования и свойствами обрабатываемой стали: коэффициент запаса волочения должен быть в пределах 1,25–3 (меньшие значения могут привести к дополнительному растяжению проволоки при волочении силой волочения; большие значения приводят к неэффективному расходу энергии волочильных станков); мощность волочения для всего маршрута волочения не должна превышать мощность мотора привода стана (запас мощности должен обеспечиваться в пределах не менее 30 %); величина коэффициента скольжения должна превышать число 0 и не превышать число 0,05 (исключение: первый переход волочения); максимальная мгновенная температура поверхности проволоки определяет запас пластичности проволоки и как следствие – величину обрывности металлокорда, свиваемого из этой проволоки после волочения.

4. Расчет энергосиловых режимов волочения: модули упрочнения проволоки, МПа; напряжения волочения, МПа; коэффициент запаса волочения; усилия волочения  $P_i$  и усилия противонатяжения  $Q_i$ , Н; мощность волочения, кВт.

5. Перерасчет основных параметров маршрута волочения при введении сдвоенных волок или оптимизации маршрута волочения.

Приведем пример расчета нового оптимального маршрута волочения ультравысокопрочной проволоки (УТ) диаметром 0,35 мм из стали 96 микро-лигированной хромом: в действующем маршруте волочения без сдвоенных волок, при скорости волочения 5 м/с все параметры находятся в допустимых пределах, за исключением максимальной температуры поверхности проволоки, равной 580 °С на 21-м переходе. При введении в маршрут шести сдвоенных волок: при скорости волочения 5 м/с все параметры находятся в допустимых пределах, за исключением максимальной температуры поверхности проволоки, равной 570 °С на 25-й волоке. Таким образом, введение шести сдвоенных волок существенно не повысило качество получаемой проволоки. С целью устранения этого недостатка 25-ю волоку заменим на сдвоенную: при скорости волочения 5 м/с все параметры находятся в допустимых пределах, включая максимальную температуру поверхности проволоки, равную 540 °С на 23-й волоке.

Для комплексной оценки качества маршрута волочения используется интегральный коэффициент расхождения параметров волочения, рассчитываемый по формуле

$$K = \frac{\left(\frac{tn}{t_B}\right)^{50} + \left(\frac{V_B}{V}\right)^{15}}{2}, \quad (2)$$

где  $tn$  – максимальная температура поверхности проволоки в маршруте волочения, °С;  $t_B$  – максимальная температура поверхности проволоки в маршруте волочения, °С;  $V_B$  – скорость волочения проволоки на выходе из волочильного стана, м/с;  $V$  – скорость волочения проволоки на выходе из волочильного стана, м/с.

При оптимизированном действующем маршруте волочения  $K = 1$ . Этот режим волочения принимается как базовый.

Если изменения в режимах волочения вызывают повышение коэффициента  $K$ , то принимаемые изменения приводят к потере эффективности волочения проволоки и свивки из нее корда.

Если изменения в режимах волочения вызывают понижение коэффициента  $K$ , то принимаемые изменения ведут к повышению эффективности волочения и свивки.

Представим примеры использования коэффициента расхождения параметров волочения:

*Пример 1.* Для режима волочения при  $tn = 540$  °С и  $V = 5$  м/с получаем  $K = 1$ . Данный оптимизированный заводской маршрут волочения с семью сдвоенными волоками, принятый как базовый, соответствует технологичности свивки корда  $4 + 3 \times 0,35UT$  не более 20 обр/т при скорости тонкого волочения 5 м/с.

*Пример 2.* Для режима волочения  $K = 7,965$ . Этот маршрут волочения соответствует заводскому маршруту волочения с 6-ю сдвоенными волоками до оптимизации при скорости волочения 5 м/с и максимальной температуре поверхности проволоки

при волочении  $570^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, эффективность оптимизированной технологии волочения и свивки увеличена почти в 8 раз.

*Пример 3.* Если в заводском маршруте волочения до оптимизации с шестью сдвоенными волоками уменьшить скорость волочения до 4 м/с, то температура поверхности проволоки уменьшится до  $528^{\circ}\text{C}$ . Для такого варианта волочения  $K = 14,373$ . Таким образом, простое снижение скорости волочения в технологии волочения до оптимизации не повышает эффективности производства корда.

*Пример 4.* Для режима волочения  $K = 0,868$ . Этот маршрут волочения соответствует новому разработанному маршруту волочения с семью сдвоенными волоками при скорости волочения 5,3 м/с и максимальной температуре поверхности проволоки при волочении  $543^{\circ}\text{C}$ . Этот режим волочения является более эффективным в сравнении с примером 1.

*Пример 5.* Если в режимах волочения уменьшить скорость волочения до 5 м/с, то максимальная температура поверхности проволоки уменьшится до 533. В таком варианте волочения  $K = 0,76$ . Этот режим волочения следует считать наиболее эффективным.

#### Л и т е р а т у р а

1. Колмогоров, В. Л. Напряжения. Деформации. Разрушения / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1970. – 162 с.
2. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.
3. Температурно-деформационный критерий оптимизации маршрутов волочения тонкой высокоуглеродистой проволоки / Ю. Л. Бобарикин [и др.] // Литье и металлургия. – 2012. – 3 вып. – С. 205–209.

### ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОТКЛОНЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КАЛИБРОВОЧНОГО БОЗОНА В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИИ В ПАРУ ЛЕПТОНОВ

Д. В. Синегрибов

<sup>1</sup> Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научные руководители: В. В. Андреев<sup>1</sup>, И. А. Серенкова<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины», Республика Беларусь

*Исследовано влияние поляризации на эффективные параметры отклонения дополнительного калибровочного бозона.*

**Ключевые слова:** стандартная модель,  $Z'$ -бозон, ограничения.

При наличии в природе «новой» физики будущие ускорительные эксперименты должны иметь отклонения от поведения стандартной модели (СМ), которая в настоящее время рассматривается как низкоэнергетическое приближение будущей фундаментальной теории. Такое отклонение можно интерпретировать, используя параметры дополнительного калибровочного  $Z'$ -бозона [1]. Основная эффективная