

# **ПОВЕРХНОСТНОЕ ТРЕНИЕ СКОЛЬЖЕНИЯ ЛЫЖ: ПРИРОДА, ПУТИ И МЕТОДЫ ЕГО УЛУЧШЕНИЯ.**

**Леонид Кузьмин**

Kuzmin Ski Technology AB, Pimpstensvägen 12, SE-653 50  
Karlstad, Sweden - Швеция, Э-адрес: leonid@kuzmin.se;

## **РЕЗЮМЕ**

Нет никаких сомнений, что скольжение лыж по снегу является очень сложным объектом для исследований. Тем не менее, скольжение лыж это только одна из областей человеческого знания. И, как правило, ученые и инженеры, которые работают в одной из таких областей, оперируют более или менее прочными рабочими гипотезами. Эти ученые обычно работают с одной гипотезой до тех пор, пока не появится другая более прочная. Глубокое изучение литературы и мои собственные многолетние наблюдения относительно современных способов подготовки лыж не дали, к сожалению, какой-либо достаточно прочной гипотезы, объясняющей форму и содержание данной процедуры. В представленной работе сделана попытка сформулировать гипотезу оптимизации скольжения лыж.

Заключение: Для достижения оптимального скольжения лыж, имеющих скользящую поверхность из какого-либо водоотталкивающего износостойкого полимера, например, из СВМПЭ или ПТФЭ, необходимо и достаточно всего лишь нанести адекватную структуру (рисунок) на скользящую поверхность лыж. Структуру адекватную имеющемуся состоянию снега. Никакие имеющиеся на сегодня общепринятые мази скольжения при этом не требуются.

Ключевые слова: скольжение лыж, скользящая поверхность лыж, мази скольжения, гидрофобность, СВМПЭ, ПТФЭ, фторполимер, структура.

В память о моем отце Николае Ивановиче Кузьмине  
одном из пионеров лыжной науки в Советском Союзе.



**Н.Кузьмин запускает болванку для теста скольжения. 1969,  
Домбай, Северный Кавказ, СССР;**



## ОГЛАВЛЕНИЕ:

<b>РЕЗЮМЕ .....</b>	<b>I</b>
<b>1 ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>1</b>
1.1 ГРАНИЦЫ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	1
1.2 ОБЩИЙ ПОДХОД.....	2
<b>2 ВСТУПЛЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
2.1 ПОЧЕМУ СОВРЕМЕННАЯ ДОКТРИНА ПОДГОТОВКИ ЛЫЖ ТАК НЕПОСЛЕДОВАТЕЛЬНА И ПРОТИВОРЕЧИВА? .....	4
<b>3 СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ СКОЛЬЖЕНИЯ ЛЫЖ ПО СНЕГУ .....</b>	<b>7</b>
3.1 ЗОНА I (ПЛЕНКА ВОДЫ ТОНЬШЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ).....	11
3.1.1 Статус-кво.....	12
3.1.2 Анализ и направления развития .....	15
3.2 ЗОНА II (ПЛЕНКА ВОДЫ ИЗЛИШНЕ ТОЛСТА).....	25
3.2.1 Статус-кво.....	25
3.2.2 Анализ и направления развития .....	26
<b>4 ВЫВОДЫ.....</b>	<b>33</b>
4.1 МАТЕРИАЛ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЫЖ .....	34
4.2 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СКОЛЬЗЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЫЖ .....	35
4.3 ТОПОГРАФИЯ (СТРУКТУРА) СКОЛЬЗЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЛЫЖ, ЕЕ ИСХОДНОЕ ПОЛУЧЕНИЕ И ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИЗМЕНЕНИЕ .....	35



"Не стыдно ли человеку науки, то есть исследователю и испытателю природы, искать свидетельство истины в душах, поработанных обычаем"<sup>1</sup>  
Марк Туллий Цицерон

## 1 ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основной целью данного исследования является идентификация топографических, физических и химических свойств скользящей поверхности лыж (СПЛ), которые оказывают существенного влияния на скольжение, и определение, что и как из этих свойств мы можем изменить для улучшения скольжения лыж по снегу.

Вторичная цель заключается в разработке практических методов для реализации обнаруженных закономерностей.

### 1.1 Границы области исследования

Трение (и статическое, и динамическое) между СПЛ и снегом является предельно сложным процессом. Однако, как обычно принято в процессе научного познания, мы должны пожертвовать реальным хитросплетением факторов проблемы для постановки обозримой и структурированной задачи. По этой причине мы принимаем общее трение лыж по снегу как действие независимых компонентов. Если различные процессы трения действуют независимо от друг друга, то полное трение может быть выражено суммой компонентов, представляющих каждый процесс [1]:

$$\mu = \mu_{plough} + \mu_{dry} + \mu_{lub} + \mu_{cap} + \mu_{dirt} \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент трение скольжения между СПЛ и снегом,  $\mu_{plough}$  – трение пропахивания,  $\mu_{dry}$  – сухое трение,  $\mu_{lub}$  – жидкостное трение,  $\mu_{cap}$  – трение по причине капиллярного сцепления («подсос») и  $\mu_{dirt}$  – трение по причине загрязнения СПЛ. Без сомнения, возможно ввести и больше компонентов полного трения скольжения, например трение связанное с электростатическими зарядами – электростатическое трение. Однако, с моей точки зрения, Уравнение (1) достаточно полно отражает процесс

---

<sup>1</sup> Cicero, M.T., De Natura Deorum (On the Nature of the Gods). 1896, London: Methuen & Co.

скольжения лыж. Во всяком случае, достаточно полно для практического применения результатов исследования.

Кроме поверхностного трения скольжения, на скорость лыж оказывает негативное влияние работа по деформации самой лыжни (лыжной трассы), то есть упругое и пластическое сопротивление слоя снега при наезде на него лыжи. Такое сопротивление (при эквивалентном состоянии трассы) в первую очередь зависит от упругих (распределение давления, эпюра) [2, 3] и вибро-резонансных характеристик лыж [4, 5]. В наших экспериментах мы не тестировали и не измеряли силы сопротивления при деформации лыжни скользящей лыжей. Таким образом, этот фактор не рассматривался. Но мы всегда старались стабилизировать этот компонент максимально возможно путем применения лыж из одной серии и путем использования плотной свежеподготовленной лыжной трассы. Соответственно, компонент  $\mu_{plough}$  (трение пропахивания) учитывает только пропахивание за счет неровностей СПЛ [6], но не учитывает макродеформацию лыжни. Исходя из этого, мы можем обозначить предмет данного исследования, как поверхностное трение скольжения между СПЛ и снегом.

Все эксперименты производились на гоночных лыжах. Однако, это не означает, что полученные результаты применимы только к лыжным гонкам. Скольжение лыж в прыжках, в горных лыжах и в лыжных гонках имеют одну и ту же природу: полиэтиленовая СПЛ скользит по подготовленной лыжной трассе.

## 1.2 Общий подход

Выбор инструментов, мазей, лыж и методов их подготовки был ориентирован на лыжные гонки. Постоянное наличие четко выраженной точки отсчета (базисной отметки) является отличительной чертой представленной работы. Часто встречаемое отсутствие такой отметки в работах по изучению скольжения лыж можно сравнить с отсутствием контрольной группы, принимающей плацебо, в медицинских исследованиях. Во многих имеющихся работах мы можем найти не вполне отчетливый термин «unwaxed = не смазанные» (относится к мазям скольжения), по моему мнению, такое определение не может считаться вполне научным определением, и оно не может служить точкой отсчета для сравнения скольжения лыж, обработанных разными способами. В других работах авторы берут за отправную точку лыжи с сухой



скользящей поверхностью (СП), обработанную наждачным камнем (штайншлифт), но и эта отправная точка недостаточно достоверна:

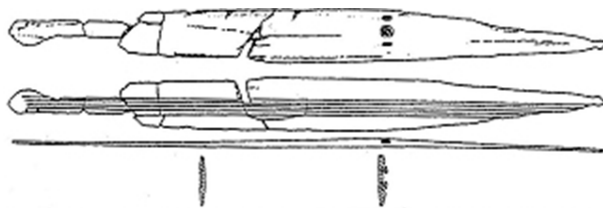
- алмазный инструмент, наносящий рисунок на наждачный камень, постоянно изнашивается, и рисунок постепенно изменяется;
- лыжи должны быть обработаны парафином для получения удовлетворительного скольжения [7].

По этой причине я рассматриваю циклевание СПЛ [7, 8] как наиболее достоверный (наиболее легко повторяемый) способ механической обработки СПЛ на сегодняшний день. Достоверный при соблюдении несложных условий: цикли должны быть заточены на одной и той же машине из одинакового сертифицированного материала, циклевка СПЛ должна быть выполнена одним и тем же специалистом. Выполнить эти условия достаточно несложно, что и было сделано в данной работе.

Необходимо подчеркнуть, что циклевка выбрана не по причине приверженности автора статьи к этому виду механической обработки СПЛ, а по причине простоты, повторяемости и достоверности «обнуления» лыж с помощью этого метода. Например, мы сравниваем лыжи обработанные парафином с референсной процикленной парой. Покатались, протестировали, лыжи загрязнились. Зашли в помещение, 2-3 прохода циклей и лыжи готовы для следующего теста. Просто и доступно. **Взятие за нулевую отметку лыж с машинными структурами (пусть даже и с одинаковыми), с парафином (пусть даже и из одной коробки) идет вразрез с элементарной теорией постановки эксперимента.**

## 2 ВСТУПЛЕНИЕ

Катание на лыжах имеет многовековую историю [9, 10]. С самого начала это было способом передвижения в зимнее время, когда земля покрыта снегом. В то же время, катание на лыжах всегда было спортом и отдыхом [11]. И развитие лыжного инвентаря следовало этим тенденциям [12].



**Рис. 1 Возраст «Saïja» лыж больше 5000 лет [10]**

Первые лыжные соревнования состоялись в Норвегии в 1767-м году [13]. Первые Зимние Олимпийские Игры были в 1924-м году в Шамони,

Франция. Международная лыжная федерация, известная под французским именем Fédération Internationale de Ski (FIS = ФИС), так же была основана в 1924-м году. ФИС чемпионаты мира по северным дисциплинам проводились с 1925-го года, по горным лыжам с 1931-го.



**Рис. 2 Норвежский лыжник Thorleif Haug во время гонки на 1-х Зимних Олимпийских Играх в 1924-м. Фото: Автор неизвестен /Scaprix**

Как мы видим, лыжи имеют очень протяженную историю развития. Правда, история лыжных соревнований намного короче. Этим, вероятно, можно объяснить тот факт, что до сих пор мы не видим прочной, хорошо структурированной, логичной и практически применимой теории вокруг скольжения лыж по снегу. Если кто-то попытается упорядочить свои знания по теме путем чтения информации в Интернете, то вероятнее всего, он потерпит поражение. Большая часть представленного в Интернете выглядит как колдовство. Ниже я постараюсь описать причины возникновения такой плачевной ситуации.

## **2.1 Почему современная доктрина подготовки лыж так непоследовательна и противоречива?**

Одной из нескольких иллюстраций этого противоречия является дискуссия относительно износа СПЛ. Большинство руководств по подготовке лыж, большинство признанных экспертов, большинство уважаемых смазчиков лыж и большинство лыжников утверждают, что имеет место позитивное влияние парафинов на уменьшение износа СПЛ.

С другой стороны, специалисты по трибологии (научная дисциплина, связанная с изучением трения и износа) полимеров не рекомендуют совместное применение полимеров и смазочных материалов. Это по причине нежелательного накопления загрязнения в зоне контакта поверхностей [14]: «...polymers are not used in general in the presence of any lubricant, this subject has nevertheless attracted interest from polymer tribologists. One obvious reason is that polymers, intentionally or unintentionally, do become subjected to lubricant contamination = ...полимеры не используются, вообще говоря, в комбинации со смазочными веществами, этот вопрос никогда не вызывал интерес у специалистов по трибологии. Одной из очевидных причин является то, что полимеры становятся объектом загрязнения смазкой». Авторы [15, 16] не нашли положительного влияния смазок скольжения на уменьшение износа СПЛ. А хорошо известный исследователь скольжения лыж японец Масаки Шимбо (Masaki Shimbo) [17, 18] весьма решителен в своих выводах: «Paraffins were found to come off almost completely from the sliding surfaces after running several hundred meters over granular summer snow = Мы обнаружили, что парафин практически полностью исчез со СПЛ после прохождения нескольких сотен метров по крупнозернистому летнему снегу». Даже авторы близкие к самому крупному производителю лыжных мазей SWIX® [19] полны скептицизма в отношении обработки лыж парафинами: «Det er imidlertid viktig å merke seg at hvis man i stor grad smelter materialet og «fyller det» med parafinvoks, vil de mekaniske egenskapene (slitestyrke o.a.) bli drastisk redusert = Однако, важно отметить, что если достаточно сильно нагревать материал (материал СПЛ – сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ))<sup>1</sup> и «насыщать» его парафином, то механические характеристики материала (стойкость к истиранию и т.д.) будут радикально ухудшены».

Как могут сосуществовать такие прямо противоположные точки зрения? Выглядит это так, как будто научные исследования и последующие научные статьи находятся в одном пространстве, в то время как катание на лыжах и подготовка лыж находятся в другом. Ниже приводятся несколько примеров такой алогичности и непоследовательности (большинство примеров взяты автором из собственной, более чем 35-ти летней, практики в лыжных гонках как спортсмена, как смазчика, как тренера, и как ученого):

---

<sup>1</sup> Комментарий автора

- Сильное и неизменное желание видеть подготовку лыж как искусство и магию, а не как технологический процесс и науку.
- Экстенсивный характер спорта высших достижений. Политический престиж и шовинизм всегда способны добыть колоссальные (практически неограниченные) ресурсы. Наличие таких ресурсов делает ненужным и нежелательным поиск наиболее эффективных методов работы. Освоение средств первично, результат вторичен.
- Желая обмануть покупателя, или благодаря некомпетентности, или по обеим причинам сразу, но производители мазей скольжения упорно распространяют и поддерживают многие ложные представления. Например: пористость СПЛ [20, 21], высыхание СПЛ, пропитка СПЛ и т.д. Беспочвенные иллюзии, которые десятилетиями циркулируют среди лыжников и специалистов.
- Очень большой вес таких псевдоаргументов как «все так делают», «никто так не делает», «всегда так делали» и «никогда так не делали» в среде признанных лыжных экспертов.
- Слабый интерес со стороны физиков и инженеров сделать свой вклад в лыжную науку [22]. Слишком много отдано на откуп бывшим спортсменам и тренерам.
- Чрезмерная фиксация на практических трудоемких манипуляциях («Здесь мерилком работы считают усталость») не дает техническому персоналу применять научные методы в своей работе.
- Недостаточные знания и малый опыт в практике лыжных соревнований высшего ранга мешают ученым проводить актуальные эксперименты. Эксперименты, дающие ответ на насущные вопросы практиков.
- Лыжная трасса – весьма и весьма сложная материя. Материя, меняющаяся каждую минуту.
- Несмотря на технический прогресс, лыжные компании не могут производить лыжи достаточно точно, так точно, как они были задуманы. Случайные колебания качества оказывают существенное влияние на упруго-эластичные и вибро-резонансные характеристики выпускаемых лыж, и такой нестабильный «фон» сильно усложняет выявление механизмов трения в интерфейсе СПЛ – снег.

- Отсутствие «контрольной группы» и однозначной отправной точки в большинстве лыжных тестов на скольжение. По-разному обработанные лыжи сравниваются в попытке выявить какую-то тенденцию. Но какой-либо «контрольной группы», достойной этого названия, не существует.
- Распространенное употребление полностью не идентифицированных (не определенных) терминов «unwaxed skis» = «не запарафиненные лыжи», «no wax» = «без парафина» во множестве научных работ. Например: [18], [23], [24], [25], [26], [27], и т.д.
- Игнорирование принципов тестирования лыж на скольжение, изложенных в [28] и в [29]. Например, большинство лыжников и специалистов сравнивают скольжение лыж на очень низких скоростях, на скоростях много ниже средней скорости гонки (Рис. 3).



**Рис. 3 Тест лыж на Чемпионате Мира по биатлону в Эстерсунде в 2008-м году**

Четкая постановка задачи, и наличие опорной структуры анализа могут помочь избежать вышеупомянутых несообразностей и противоречий. Ниже будет изложен структурный анализ проблемы скольжения лыж по снегу.

### **3 СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ СКОЛЬЖЕНИЯ ЛЫЖ ПО СНЕГУ**

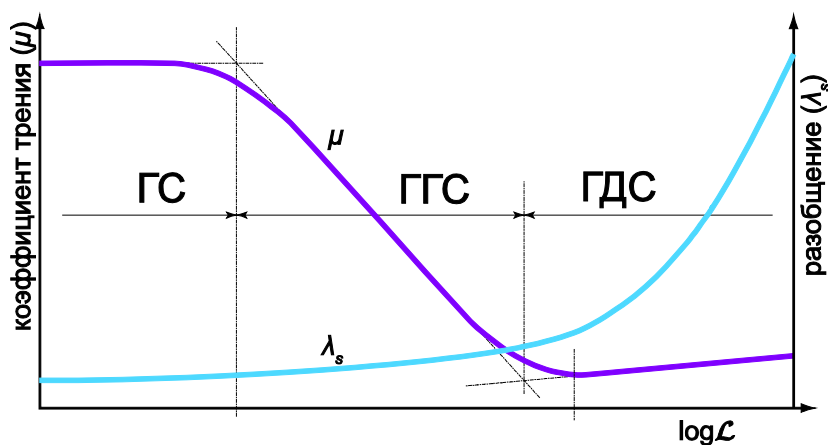
Несмотря на сложную природу снега и лыжной трассы, мы будем использовать классические трибологические методы для анализа

скольжения лыж по снегу. Наш анализ будет базироваться на общепринятой теории о плавлении снежных кристаллов за счет тепла, выделяющегося при трении [30-33]. На Рис. 4 представлена классическая иллюстрация трения при наличии смазки – обобщенная кривая Штрибека. На оси абсцисс лежит величина смазки [34]. Это число представлено как:

$$\mathcal{L} = \frac{\eta u_s}{p_{av} R_a} \quad (2)$$

где  $\eta$  – вязкость смазки (в нашем случае – воды),  $u_s$  – относительная скорость,  $p_{av}$  – среднее давление в контакте и  $R_a$  – общее среднее отклонение высоты неровностей, заданное как

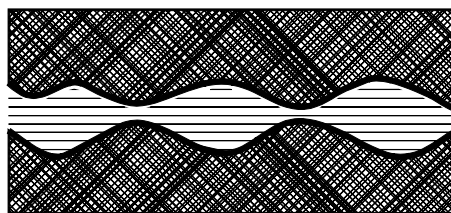
$$R_a = \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2} \quad (3)$$



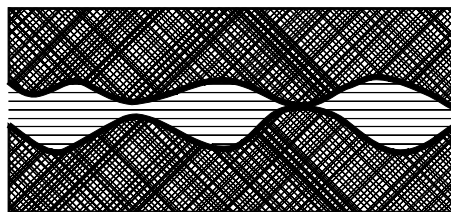
**Рис. 4 Обобщенная кривая Штрибека. ГДС: Гидродинамическая (полная) смазка, ГГС: Смешанная гранично-гидродинамическая смазка, ГС: Граничная (тонкопленочная) смазка. Из [34, 35]**

Когда скорость скольжения велика, и объем смазки (талой воды) достаточно большой, мы получаем гидродинамический эффект, и поверхности полностью разделяются (разобщаются) смазкой (Рис. 5а). В этом случае давление жидкости в контакте достаточно высоко для полного разделения поверхностей, и это называется режимом гидродинамической (полной) смазки (ГДС). Когда же скорость и/или объем смазки (воды) падают, то и давление жидкости в зоне контакта падает (гидродинамический эффект уменьшается). Как результат, вершины неровностей двух поверхностей начинают касаться друг друга, и часть давления поверхностей переносится на эти вершины. Это ведет к увеличению трения. В этом случае трение образуется за счет сдвигов и в соприкасающихся вершинах и в смазке. Это переходный режим, и он

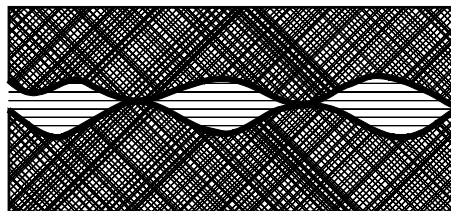
называется смешанным гранично-гидродинамическим режимом (ГГС), см. Рис. 5б. Путем дальнейшего уменьшения скорости и/или объема воды, давление жидкости в контакте уравнивается с окружающим давлением. По причине этого еще большее количество неровностей входит в контакт, и нагрузка практически полностью переходит на вершины неровностей. Режим называется граничным (тонкопленочный) режимом (ГС), см. Рис. 5в. В ГС режиме трение контролируется напряжением при сдвиге пограничных слоев на поверхности твердых тел (СПЛ и кристаллы снега).



а) ГДС



б) ГГС



в) ГС

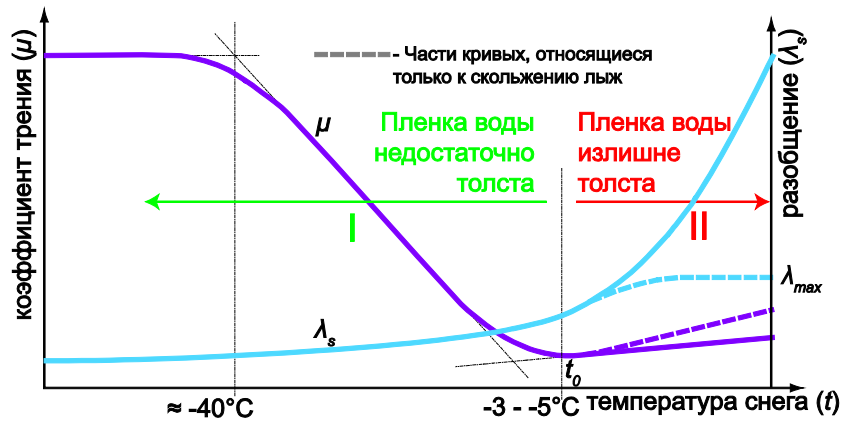
**Рис. 5 Три режима смазки: а) Гидродинамический (ГДС), б) Смешанный гранично-гидродинамический (ГГС), в) Граничный (тонкопленочный). Из [36]**

Обычно классическая трибология обслуживает инженерные нужды индустрии. Например, конструирование различных машин. При создании машин всегда рассчитывается оптимальный объем смазки в узлах трения. В случае скольжения лыж, объем смазки (объем талой воды) зависит от температур и влажности снега, от температур и влажности воздуха, от скорости скольжения лыж, и от других неконтролируемых параметров. Другое весьма существенное отличие между скольжением лыж и стандартными индустриальными приложениями заключается в траектории

движения трущихся поверхностей. Инженер-механик имеет дело с круговым или возвратно-поступательным движением. В этих случаях одна и также смазка используется многократно. Лыжник имеет дело с поступательным движением (движение в одном направлении), и смазка (вода) не может быть использована повторно. Трение лыж непрерывно генерирует все новое и новое количество смазки на всем протяжении лыжной трассы. Таким образом, уравнение (2) слабо применимо, если мы хотим отобразить кривую Штрибека от температуры снега на оси абсцисс. Однако, так как температура снега влияет на объем талой воды, а объем, в свою очередь, влияет на толщину разделительного слоя, согласно  $\lambda_s$  на Рис. 4, мы имеем право привлечь обобщенную кривую Штрибека к описанию скольжения лыж по снегу.

На Рис. 6 представлена интерпретация кривой Штрибека применительно к скольжению лыж по снегу. Точка перехода от ГС к ГГС (лыжи едут как по песку) примерно определена как  $-40^\circ\text{C}$  с учетом данных из [1, 30, 37], точка с минимальным трением  $t_0$  как  $-3 - -5^\circ\text{C}$  с учетом данных из [30, 38-41]. Также место нахождения этих точек зависит и от других параметров, не только от температуры. Например, от скорости скольжения. Тем не менее, указанные точки и графики хорошо отображают практическую задачу, стоящую перед каждым, кто хочет получить безупречное скольжение лыж. Дополнительно, необходимо определить и объяснить некоторые особенности, отличные от классической кривой Штрибека. Мы приняли, что вес лыжника и скорость постоянны. По этой причине максимальное разделение имеет конечное значение  $\lambda_{\max}$ . Коэффициент трения в зоне II увеличивается, не только следуя теории гидродинамического трения, но и благодаря увеличению площади контакта между снегом и СПЛ посредством слоя воды [42-47].





**Рис. 6** Обобщенная кривая Штрибека модифицированная и примененная автором к скольжению лыж. Скорость скольжения постоянна. I: Температура снега ниже оптимальной, II: Температура снега выше оптимальной.

Путем этой иллюстрации (Рис. 6), сделана попытка более отчетливо представить проблему получения хорошего скольжения лыж по снегу. Это представление (обобщение) носит ярко выраженный качественный характер. Участок в районе точки минимального трения мало актуален, трение и так уже весьма мало. Таким образом, ниже мы будем рассматривать зону I и зону II, будем анализировать статус-кво и предложим стратегию развития на будущее.

### 3.1 Зона I (пленка воды тоньше оптимального значения)

Граничный (тонкопленочный) режим трения/смазки не актуален для соревновательной деятельности лыжника. Следуя правилам ФИС (303.2.2) старт переносится при температуре воздуха ниже  $-20^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, мы будем рассматривать только смешанный гранично-гидродинамический режим (ГГС) в зоне I. Мы имеем недостаток смазки, тонкая пленка воды не способна полностью разобшить грани снежных кристаллов и неровности СПЛ. Исходя из этого, мы можем упростить уравнение (1) путем исключения переменных  $\mu_{cap}$  (излишне сухо) и  $\mu_{dirt}$  (следуя [48], загрязнение СПЛ на холодном сухом снегу незначительно):

$$\mu = \mu_{plough} + \mu_{dry} + \mu_{lub} \quad (4)$$

### 3.1.1 Статус-кво

Здесь мы рассмотрим материалы и технологии, способные уменьшить трение скольжения лыж на холодном сухом снегу. Мы рассмотрим только те материалы и технологии, которые практически доступны на сегодня.

#### 3.1.1.1 *Материал скользящей поверхности лыж*

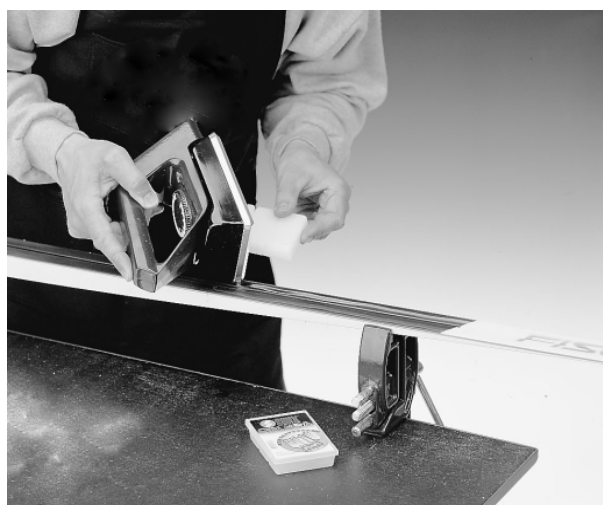
Полиэтилен использовался как материал СП горных лыж уже с конца 1950-х [49]. Трудно сказать, какой тип полиэтилена использовался в то время, был это полиэтилен высокой плотности (HDPE = ПЭВП) или сверхвысокомолекулярный полиэтилен (UHMWPE = СВМПЭ). Старая классификация полиэтиленов не дает точного ответа [50]. Но можно с уверенностью сказать, что с 1974-го и по сегодняшний день гоночные лыжи со СП из СВМПЭ распространены весьма широко.

Имеется две общие разновидности современных СПЛ из СВМПЭ: беспримесная прозрачная (опаловая) СПЛ и «графитовая» черная СПЛ с примесью сажи (аморфный углерод). Различные прозрачные СПЛ имеют молекулярный вес в пределах  $3 \times 10^6 - 12 \times 10^6$  г/моль [51]. Черная («графитовая») СПЛ весьма похожа по своим характеристикам на прозрачную и подразделяется по молекулярному весу и содержанию сажи.

В начале, с 1974-го года, на лыжах имелась только прозрачная СПЛ. Строго говоря, от производителей лыж никогда не поступало четких рекомендаций и обоснований по выбору типа СПЛ. С начала 80-х появилась возможность выбирать лыжи или с прозрачной, или с «графитовой» СП. Однако, и тогда и сейчас рекомендации производителей лыж на удивление сильно варьируются. В какие-то периоды прозрачная СПЛ рекомендовалась только для холодного сухого снега, в другие годы только для мокрого. Похожая ситуация и с процентным содержанием сажи в материале СПЛ. В начале 90-х можно было прочесть в каталоге одной фирмы о превосходных качествах их лыж на холодный снег с «графитовой» СП с низким содержанием сажи. Одновременно другая компания писала о превосходных качествах своих лыж на холодный снег с «графитовой» СП с высоким содержанием сажи. Это говорит и об уровне науки в области производства лыж. Сегодня большинство гоночных лыж имеют «графитовую» СП.

### **3.1.1.2 Физико-химическая обработка скользящей поверхности лыж**

Имеется один общепринятый способ физико-химической обработки СПЛ для сухого и холодного снега – наносить парафин (Рис. 7). Другими словами, в более общем значении, наплавлять слой мази скольжения (это может быть и фторуглеродный порошок). Все мази скольжения, представленные на современном рынке лыжных продуктов, очень сильно похожи (почти идентичны), как это указывается в [52]: «...the strategy in wax development by the various manufacturers follows the same general rules concerning the hydrocarbon composition (long to short alkanes) = ...производители мазей скольжения следуют одинаковой стратегии в отношении углеводородной композиции (от длинных до коротких алканов)». И даже хуже, изготовители идут на обман [53]: «The compositional analysis showed that one company's three lines of Alpine and Nordic glide waxes to be compositionally equivalent = Анализ состава показал, что три разных класса горнолыжных и лыжных мазей скольжения имеют полностью идентичный состав». Рекомендации изготовителей мазей скольжения сходны: ниже температура – тверже мазь.



**Рис. 7 Наплавление мази скольжения**

### **3.1.1.3 Топография (структура) скользящей поверхности лыж, ее исходное получение и дальнейшее изменение**

Механическая обработка СПЛ может быть разделена на две группы: машинная шлифовка лыж (штайншлифт) и циклевка. Сейчас штайншлифт [16, 54-57] является общепринятым способом обработки СПЛ, производители лыж обычно применяют штайншлифт для выравнивания

СП новых лыж. Циклевка лыж имеет целый ряд многообещающих преимуществ [7, 8, 58], но метод не принимается лыжным истеблишментом, и по этой причине широко не распространен.



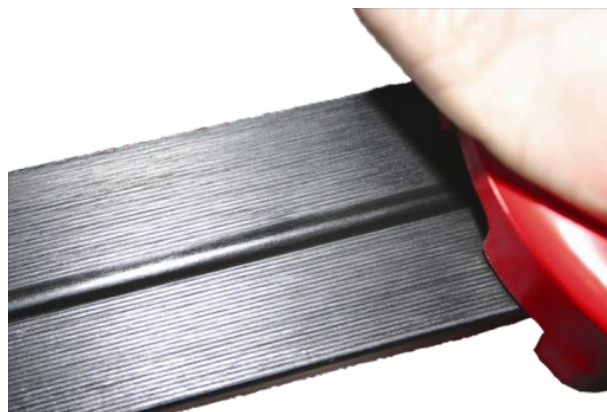
**Рис. 8 Штайншлифт (с [www.wintersteiger.com](http://www.wintersteiger.com))**

Рекомендации производителей лыж и специалистов штайншлифта достаточно прямолинейны: холоднее снег – тоньше (менее глубокий) рисунок.

После исходной механической обработки СПЛ, ее топография может быть изменена с помощью подходящей ручной накатки, см. Рис. 9 и Рис. 10.



**Рис. 9 Ручная накатка**



**Рис. 10** Применение ручной накатки

Обычная практика для сухого холодного снега: использование очень мелкой накатки, или совсем без накатки.

Другой метод для изменения (заглаживания) топографии СПЛ: применение парафинов. Наплавленный парафин заполняет углубления на СПЛ и тем самым выравнивает топографию.

### **3.1.2 Анализ и направления развития**

Ниже приведен анализ имеющихся материалов и технологий. Предложены пути снижения трения скольжения лыж по холодному сухому снегу.

#### **3.1.2.1 *Материал скользящей поверхности лыж***

**Твердость** – Для уменьшения коэффициентов  $\mu_{plough}$  и  $\mu_{dry}$  из уравнения (4), материал СПЛ должен быть тверже кристаллов снега. К сожалению, кристаллы снега становятся тверже применяемого материала (СВМПЭ) уже при температурах ниже  $-15^{\circ}\text{C}$  [59-65]. Таким образом, нам необходимо искать более твердые материалы для СПЛ. Более того, если СПЛ тверже кристаллов снега, ее скольжение по снегу будет производить большее количество талой воды, потому что СПЛ будет деформировать кристаллы снега, а не наоборот. Больше воды – больше смазки – ниже трение. Следовательно, твердость СПЛ способствует появлению талой воды [23, 43], распределению пленки талой воды [66] и, как результат, уменьшению величин  $\mu_{dry}$  и  $\mu_{lub}$  из уравнения (4) [42]. Несмотря на применение других материалов и на низкие скорости скольжения, Рис. 11 дает хорошую иллюстрацию положительного влияния на скольжение высокой твердости СПЛ.

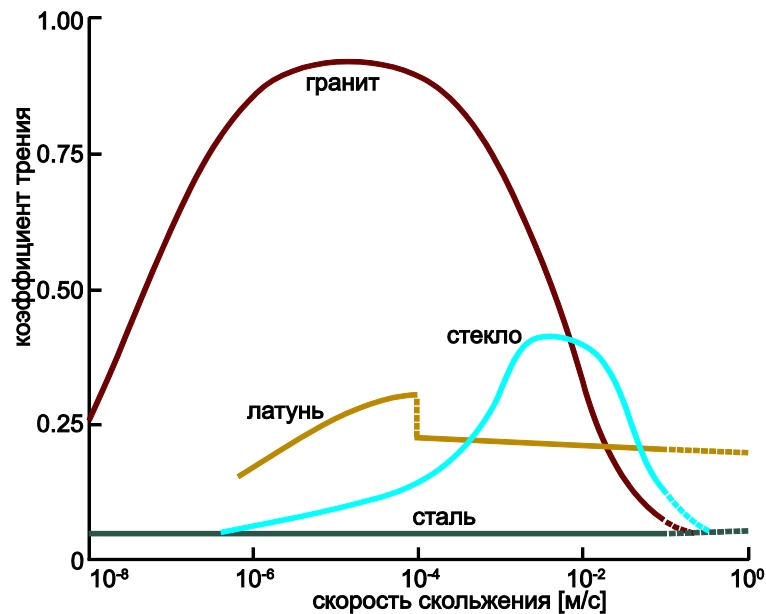


Рис. 11 Трение на льду при -11,7°C [62]

**Износостойкость к истиранию** – Сухой и холодный снег чрезвычайно абразивен и легко может источить металл [67] и даже камень [68]. Таким образом, высокая износостойкость является необходимым требованием к материалу СП. СВМПЭ очень износостойкий материал [69], эволюция этого материала протекает достаточно прямолинейно: увеличение молекулярного веса уменьшает коэффициент сухого трения ( $\mu_{dry}$ ) и увеличивает износостойкость [70-72]. Другой способ повышения износостойкости СВМПЭ – это армирование материала другими адекватными субстанциями. Но, к сожалению, такое армирование понижает скользкие свойства материала [73]. В случае с материалом СПЛ причина применения наполнителей остается неясной. Нет данных говорящих о коэффициенте сухого трения «графитовой» СПЛ, но как видно из Табл. 1, смешивание СВМПЭ с сажей не повышает его износостойкость. Обширные библиографические изыскания не дали объяснения популярности «графитовой» СПЛ. В начале добавки аморфного углерода объяснялись его антистатической ролью (электропроводная добавка). Но американские ученые не нашли никакой зависимости между электропроводными свойствами СПЛ и величиной электростатического заряда [74-77]. Поэтому остается только одна целесообразная причина добавления сажи в материал СПЛ: черный цвет. Черный цвет способствует увеличению температуры СПЛ за счет абсорбции окружающего солнечного света [78-80]. Но можно добиваться этого положительного эффекта избегая негативных воздействий присадок

сажи (понижение износостойкости и гидрофобности [81]). Надо просто добавить в материал СПЛ интенсивный черный краситель.

**Табл. 1 Свойства материала СПЛ, Electra = СВМПЭ с сажей (данные приведены фирмой Gurit (Ittigen) AG)**

	P-Tex <sup>®</sup> 2000	P-Tex <sup>®</sup> 2000 Electra <sup>®</sup>
<b>Молекулярный вес (ISO/R1191) [г/мол]</b>	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$
<b>Плотность (DIN 53479) [г/см<sup>3</sup>]</b>	0,935	1,0
<b>Износостойкость (Sand-slurry Steel 37 = 100)</b>	20	30
<b>Модуль упругости (DIN 53457) [МПа]</b>	500	600

Но есть один высокотехнологичный материал, добавка которого может дать нам очень многообещающую СПЛ для сухого морозного снега. Этот материал – квазикристаллы. Квазикристаллы обладают очень низким коэффициентом сухого трения [82] и очень гидрофобны [83]. СВМПЭ, армированный частицами квазикристаллов демонстрирует более высокую износостойкость, чем чистый СВМПЭ [84, 85].

**Смачиваемость** – Мы находимся в зоне I (Рис. 6), и мы имеем дефицит смазки (дефицит талой воды). Тем не менее, более гидрофобная СПЛ способна более эффективно распределить тонкую пленку воды, чем менее гидрофобная [17, 43, 59, 86]. Также и адгезия между СПЛ и снегом уменьшается при увеличении ее гидрофобности [87]. Мои собственные [48] и другие [88] результаты тестов показывают более низкое трение лыж с более водоотталкивающей СП. Поэтому, даже для условий холодного и сухого снега мы должны применять СПЛ с максимально высокой гидрофобностью. В этой связи, такая субстанция как политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторполимер, фторопласт) должна быть наиболее предпочтительным материалом для СПЛ. Уже давно, в 1953-м году [59, 89, 90] ПТФЭ рассматривался как наиболее перспективный материал СПЛ. Тем не менее, производители лыж игнорируют ПТФЭ по причине его низкой износостойкости (низкой по сравнению с экстремально износостойким СВМПЭ) и трудностями при приклейке материала к лыже. Однако, приклеивание ПТФЭ не очень сложно в современных условиях [91, 92]. Да, стандартный ПТФЭ имеет довольно низкую износостойкость [73], но он может быть заменен на ПТФЭ с молекулярной структурой,

имеющей поперечные связи (разветвленная структура) [93]. Такой материал характеризуется высокой степенью износостойкости [94, 95], что и требуется при скольжении по сухому холодному снегу. Также и с точки зрения охраны здоровья, СПЛ из фторполимера имеет преимущества. Нет необходимости использовать опасные для здоровья [96, 97] и экологии [98, 99] фторуглероды (перфторуглеводороды) для повышения водоотталкивающих свойств СПЛ.

**Теплопроводность** – Следуя теории скольжения по пленке талой воды, мы видим, что уменьшение теплопроводности материала СПЛ должно играть исключительно позитивную роль [30, 32, 40, 66, 100-102]. Низкая теплопроводность СПЛ экономит тепло, полученное при трении, и это тепло идет на получение еще большего объема смазки – талой воды. Исходя из этого, очень трудно понять присутствие весьма теплопроводной сажи ( $24,0 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ) в малотеплопроводном СВМПЭ ( $0,4 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ) [64]. Это понятно в горнолыжных приложениях, там высокие скорости и много тепла при перекантровке выделяется, тепло это надо отводить. Оттуда, кстати, и пошла мода на «графитовую» СПЛ, и она оправдана. Но для гоночных лыж в условиях холодного и сухого снега, мода эта не только не оправдана, она прямо противопоказана.

### ***3.1.2.2 Физико-химическая обработка скользящей поверхности лыж***

Здесь необходимо прояснить точку зрения автора на применение терминов, имеющих отношение к смазке скользящей лыжи. В среде лыжников и специалистов живет иллюзия, что парафины могут играть роль смазки в условиях дефицита талой воды. Да, они могут это делать, но лишь на дистанции в несколько сотен метров [17, 18, 103]. После этой дистанции мы увидим серо-белые пятна на некогда антрацитово-блестящей СПЛ. Это сошел парафин, и поднялся микроворс, оставшийся от штайншлифта. Вышеупомянутая иллюзия базируется на отождествлении скольжения лыж по снегу со скольжением трущихся поверхностей в индустрии. Но это полностью неверно. Как уже было сказано в разделе 3, на лыжах мы движемся поступательно. И если мазь скольжения или добавки сухих смазок (сажа, молибден диоксид и т.д.) [104] играют роль в разобщении трущихся поверхностей (снег и СПЛ), то такие мази или добавки должны оставаться на лыжной трассе, и они не могут принимать дальнейшего участия в процессе скольжения лыж.



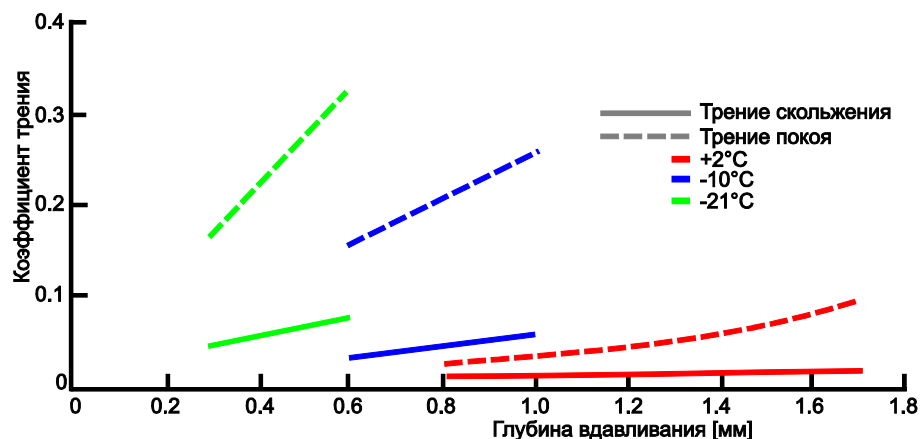
Другое заблуждение: вера в то, что парафин, растворившийся в микроскопическом количестве в аморфной фазе СВМПЭ [105, 106] «выпотевает» и уменьшает трение. Из [107]: «During sliding, first the thin wax layer at the surface wears off, then the «stored» wax in the base is «sweating» due to a reversed diffusion process and supplies the gliding interface with lubricating material = При скольжении, слой парафина на СПЛ стирается, и затем «заготовленный» в толще СПЛ парафин «выпотевает» наружу за счет обратной диффузии и снабжает смазкой трущиеся поверхности». Сказанное выглядит очень и очень привлекательно, это должно быть универсальным решением в условиях агрессивного снега. Но если мы предположим необходимость слоя парафина в 1 мкм (чего, конечно, недостаточно) толщиной для частичного разделения граней снежных кристаллов и неровностей СПЛ на дистанции в 10 км, то мы можем вычислить необходимое количество парафина с помощью следующего уравнения (принимая ширину лыжи за 40 мм):

$$10^4 \times 4 \cdot 10^{-2} \times 10^{-6} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3\text{]} \quad (5)$$

Мы получим необходимый «запас» парафина в объеме 0,4 литра на одну лыжу. Это совершенно не реально. Более того, авторы [19] весьма скептически относятся к механизму «выпотевания», а авторы [106, 108] еще более решительны в своей критике. Они твердо отрицают само наличие такого механизма. Несмотря на вышесказанное, обычай «насыщать» СПЛ много раз расплавленным парафином очень популярен в среде лыжников и технического персонала. Однако, невозможно найти какое либо внятное доказательство позитивного влияния такого «насыщения». Как не странно, все наоборот. Авторы [19] обращают внимание на значительное ухудшение основных механических свойств материала после такой обработки. Мои собственные опыты [109] хорошо подтверждают эту констатацию. К счастью, общепринятая обработка парафинами и утюгом не достаточно продолжительна для достижения существенного повреждения СПЛ, но температура может быть излишне высокой, и СПЛ будет испорчена. Например, обработка (прогрев) с помощью “Thermo Bag” (“Thermo Box”) [110] происходит с низкой температурой, и для какого-то видимого «насыщения» нужны годы. Но, если температура будет выше, то СПЛ воистину насытится, разбухнет и отслоится от лыжи [109]. Другой интересный вопрос: а насколько положительно такое «насыщение» для скольжения лыж по снегу? Если это хорошо, почему производители СПЛ не «варят» ленту будущей СПЛ в парафине до полного насыщения? Это было бы намного логичнее,

эффективнее и дешевле. Почему это должен делать конечный потребитель?

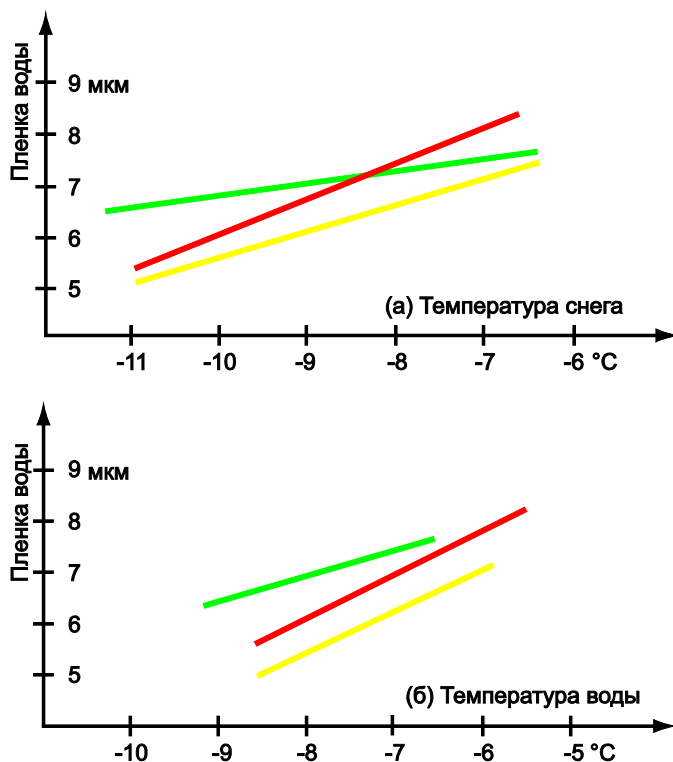
Другая многолетняя квазинаучная гипотеза заключается в том, что якобы имеется необходимость подгонять твердость внешнего слоя СПЛ к актуальной твердости кристаллов снега. Предполагается, что это должно уменьшить трение скольжения лыж. Из [107]: «...one of the purposes of wax is to adjust the hardness of the sliding surface to match the hardness of the snow = ...одно из назначений мазей скольжения заключается в изменении твердости СПЛ в зависимости от жесткости снега». Однако, классическая трибология не декларирует такого общего правила. Очень трудно понять, как возможно деформировать и плавить кристаллы снега, и этим улучшать скольжение, если СПЛ имеет одинаковую с кристаллами твердость. СПЛ должна деформировать и шлифовать кристаллы снега для образования талой воды, и поэтому она должна быть как можно более жесткой. И множество авторов подтверждают это [1, 18, 23, 43, 59, 62, 66, 102, 111, 112]. Известный японский ученый Masaki Shimbo дал нам очень хорошую иллюстрацию зависимости трения от твердости СПЛ (Рис. 12) [18]. Легко увидеть, что жесткая поверхность скольжения предпочтительна при любых температурах. Более того, мой собственный эксперимент показывает невозможность адекватного изменения твердости СПЛ для холодного сухого снега [109] с помощью даже самых твердых парафинов.



**Рис. 12 Трение скользящих поверхностей покрытых парафинами разной твердости при разных температурах. Твердость дана глубиной вдавливания (мм) [18]**

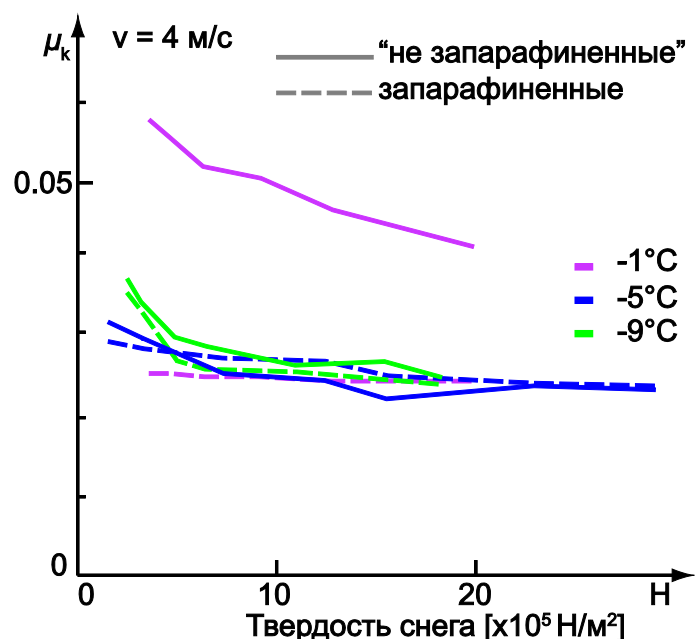
Еще одно популярное утверждение заключается в том, что оптимальная толщина пленки талой воды может быть достигнута только с помощью мазей скольжения, рекомендованных производителем для данной

температуры [107]. Обычно, для поддержки этой сентенции ссылаются на одну из классических работ [23]. Однако если непредубежденно взглянуть на ключевые места этой работы (Рис. 13), то можно увидеть ту же тенденцию, что и выше: более твердая СПЛ генерирует большее количество талой воды.



**Рис. 13 Зависимость пленки воды от температуры снега (а) и воздуха (б) для лыж с разными парафинами (Токо зеленый, красный и желтый) [23]**

Настал момент для демонстрации графиков 6 и 8 из одной финской работы [25]. Эта работа была сделана с применением достаточно современных лыж и мазей скольжения. На Рис. 14 представлено наложение двух вышеуказанных графиков. Если мы проигнорируем употребление неопределенного термина «не запарафиненные» (но мы можем исключить штайншлифт, эта техника еще не пришла в лыжные гонки в 1986 году), то увидим, что представленные кривые довольно убедительно говорят в пользу моих собственных результатов из работы [48] (исключая кривую для  $-1^{\circ}\text{C}$ ).



**Рис. 14** Коэффициент трения скольжения как функция твердости снега [25]

Таким образом, исходя из вышеупомянутого, из измерений, представленных в Табл. 2, из проведенных экспериментов [25], невозможно объяснить необходимость и пользу обработки СПЛ парафинами при наличии холодного агрессивного снега. Единственно обоснованная цель применения парафинов в таких условиях, это уменьшение глубины (глубины) структур на СПЛ. Но это временное и не самое эффективное решение. Также надо принимать во внимание большой вред экологии [113-115] и риск для здоровья [96, 116-120] при применении мазей скольжения.

**Табл. 2** Твердость материалов СПЛ и некоторых мазей скольжения, созданных для холодного снега. Замеры проводились при комнатной температуре

Материал	Твердость [Shore D]
P-Tex <sup>®</sup> 2000 Electra <sup>®</sup>	65.7
P-Tex <sup>®</sup> 2000	64.2
P-Tex <sup>®</sup> 4000	67.3
P-Tex <sup>®</sup> 5000	68.6
Star парафин NA8 (-8°/-20°C)	50.4
Swix <sup>®</sup> LF4 -10°C/-20°C	47.8
Toko <sup>®</sup> Dibloc LF -10°C to -30°C	46.9
Vauhti графит антистатик Hard -7°...-25°C	46.7

### 3.1.2.3 Топография (структура) скользящей поверхности лыж, ее исходное получение и дальнейшее изменение

Как уже упоминалось в разделе 3.1.1.3, штайншлифт и ручные накатки являются наиболее распространенными методами нанесения структуры (рисунка) на СПЛ. Однако, так как мы уже имеем дефицит талой воды для смазки скольжения лыж, то эти методы могут усложнить ситуацию. Направление минимального элемента рисунка штайншлифта (даже у так называемых «Х» структур) и большинства накаток точно соответствует направлению движения [55-57]. По этой причине такие структуры сделают недостаточно толстую пленку воды еще тоньше [121-123], что приведет к ухудшению скольжения. Таким образом, для максимально эффективного использования тонкой пленки воды надо разрабатывать новые методы нанесения структур на СПЛ для получения топологии с углами к направлению движения отличными от  $0^\circ$  [43, 124]. Позитивный эффект (лучше скольжение) от таких структур на холодном и сухом снегу (льду) был продемонстрирован в экспериментах несколькими учеными [40, 66]. Другой многообещающий метод, который никогда не использовался в лыжах, это создание «лунного ландшафта» на СПЛ. Такая адекватно созданная структура (Рис. 15) сдвигает ГГС область и точку  $t_0$  левее (Рис. 6) и по этой причине уменьшает коэффициент трения [125].

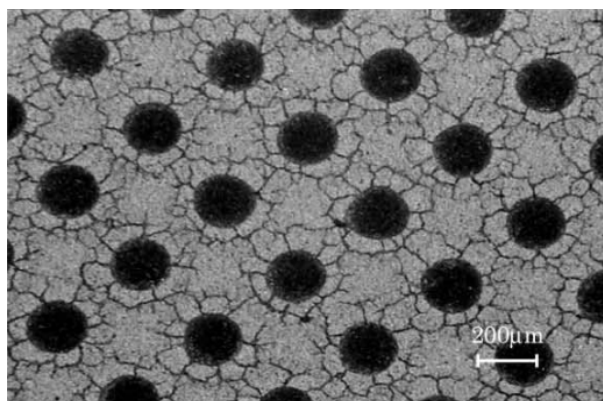
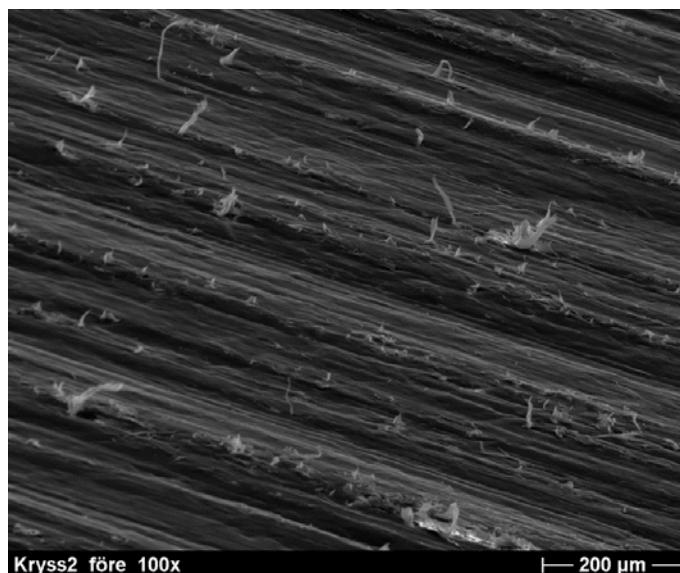


Рис. 15 Оптический микроснимок пор на поверхности, сделанных лазером [125]

Кроме того, как справедливо указано в [126], неровность (шероховатость) СПЛ после штайншлифта излишне велика ( $R_a$  около 10 – 150 мкм) для ее эффективного использования при очень тонкой (от 50 нм [127] до 13,5 мкм [23] и до 10 – 50 мкм [31]) пленке талой воды. Другими словами, даже самый тонкий штайншлифт излишне груб. Конечно,

нанесение парафина на СПЛ может загладить ее, и это будет работать на коротком отрезке дистанции (несколько сотен метров), но прямое механическое выравнивание [128] безусловно предпочтительнее.

Еще один наиболее известный недостаток штайншлифта, это получение микроворса на СПЛ (Рис. 16) [129]. Лыжи после штайншлифта должны пройти неоднократную обработку парафином, иначе такие лыжи очень и очень плохо скользят [7, 26]. Даже водоотталкивающие свойства СПЛ меняются в нежелательную сторону за счет проникновения частиц абразивного круга в материал СПЛ при штайншлифте [130]. Строго говоря, абразивная обработка полиэтилена наждачным кругом, как это делается в лыжах, очень малоприменимая и нежелательная технологическая операция в индустрии.



**Рис. 16 Типичная СПЛ сразу после штайншлифта [131]**

Как было сказано выше, гидрофобная (поверхность с низкой свободной энергией [132, 133]) СПЛ всегда предпочтительна. Однако, даже материал с самой низкой свободной энергией ( $6.7 \text{ мДж/м}^2$  для поверхности с ориентированными и плотно гексагонально упакованными  $-\text{CF}_3$  группами)<sup>1</sup> дает контактный угол смачивания с водой около  $120^\circ$  [134, 135]. То есть, если мы хотим увеличить гидрофобность СПЛ еще больше, мы должны произвести адекватную оптимизацию структуры поверхности [136]. Имеется несколько методов получения супергидрофобных поверхностей, например, фрактальная поверхность [137], иерархические

<sup>1</sup> Это значение намного меньше ( $22 \text{ мДж/м}^2$ ) политетрафторэтилена (ПТФЭ)

микро- и наноструктуры [138], и даже есть методы измерения фрактальности структур СПЛ [139], но фрактальные поверхности и многие другие виды супергидрофобных поверхностей весьма чувствительны к повреждениям и нагрузке [140, 141]. С этой точки зрения, весьма многообещающими выглядят поверхности со случайными структурами [142]. Такие структуры могут быть нанесены на фрезерном станке с ЧПУ типа CNC, или даже пескоструйным аппаратом [143]. Кроме того, обработка СПЛ плазмой [144, 145] выглядит многообещающе с точки зрения износостойкости [146].

## 3.2 Зона II (пленка воды излишне толста)

Имеет место избыток смазки. Пленка талой воды полностью разделяет грани снежных кристаллов и неровности СПЛ. Это значит, что мы можем упростить уравнение (1) путем устранения величин  $\mu_{plough}$  и  $\mu_{dry}$ :

$$\mu = \mu_{lub} + \mu_{cap} + \mu_{dirt} \quad (6)$$

### 3.2.1 Статус-кво

Здесь мы рассмотрим материалы и технологии, способные уменьшить трение скольжения лыж на мокром снегу. Но мы рассмотрим только те материалы и технологии, которые практически доступны на сегодня.

#### 3.2.1.1 *Материал скользящей поверхности лыж*

См. 3.1.1.1.

#### 3.2.1.2 *Физико-химическая обработка скользящей поверхности лыж*

Имеется два основных общепринятых способа физико-химической обработки СПЛ для мокрого снега: наплавление или натирание мазей скольжения и нанесение фторуглероды-содержащие жидкости и эмульсии. Однако, ожидаемый результат не гарантируется, производители идут иногда и на прямой обман. Например, мы можем прочесть в [53]: «In response to the study, one of the wax manufacturers contended that additives were present in their waxes and that the trace chemicals were critical to the waxes' performances. The subsequent chemical analyses were unable to confirm the presence of additives = В ходе исследований один из производителей мазей скольжения декларировал наличие одной добавки в его продукте и утверждал, что содержание этой добавки принципиально для работы смазки. Последующий химический анализ не мог подтвердить присутствия

данной добавки». Рекомендации различных производителей полностью идентичны: выше температура – мягче мази и выше содержание фторуглеродных добавок или чистые фторуглеродные порошки.

### ***3.2.1.3 Топография (структура) скользящей поверхности лыж, ее исходное получение и дальнейшее изменение***

Пожалуйста, см. 3.1.1.3. Рекомендации производителей лыж и специалистов штайншлифта достаточно просты: чем больше свободной воды содержит снег, тем грубее (глубже) рисунок штайншлифта и более грубые (более редкая гребенка) ручные накатки используются.

## **3.2.2 Анализ и направления развития**

Ниже приведен анализ имеющихся материалов и технологий. Предложены пути снижения трения скольжения лыж по мокрому снегу.

### ***3.2.2.1 Материал скользящей поверхности лыж***

**Твердость** – С учетом уравнения (6), твердость оказывает значение только на третью переменную  $\mu_{dirt}$ , так как твердый и упругий (пружинистый) материал отталкивает грязь лучше, чем мягкий и вязкий [48, 58]. Стандартный ПТФЭ должен хорошо работать в условиях грязного мокрого снега.

**Стойкость к истиранию** – Мы в данный момент рассматриваем скольжение лыж на мокром снегу в ГДС режиме (Рис. 4). В этом случае истирание СПЛ практически отсутствует.

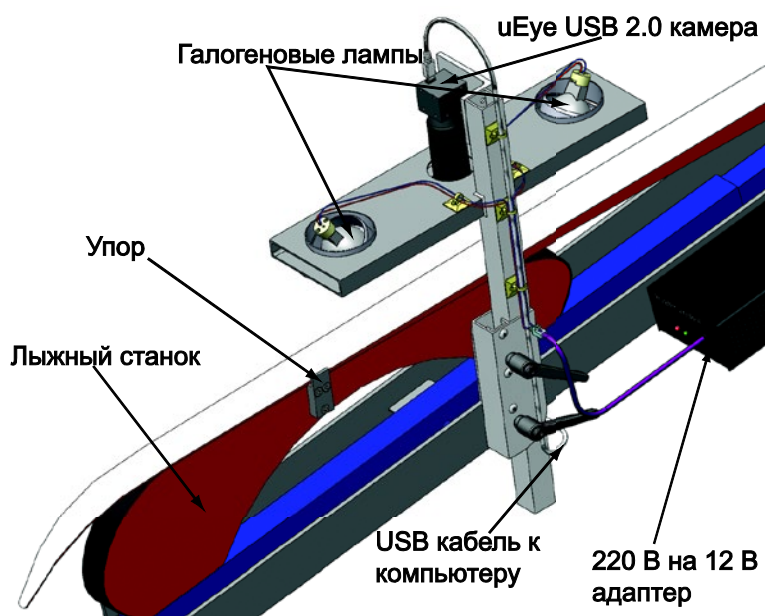
**Смачиваемость** – Благодаря низкой смачиваемости (высокой гидрофобности) материала СПЛ можно легко добиваться высокой гидрофобности и самой поверхности скольжения, тем самым уменьшая нежелательное трение [86]. В уравнении (6) этот процесс влияет на уменьшение переменной  $\mu_{cap}$ . С этой точки зрения очень трудно понять присутствие добавок сажи в СПЛ, ведь это уменьшает ее гидрофобность [147]. Отдельные лыжные компании в производстве лыж используют СПЛ с фторуглеродными добавками [148] для увеличения ее водоотталкивающих свойств. Однако, такие добавки весьма летучи, и их присутствие в материале СПЛ сильно ухудшает его механические свойства [108]. Таким образом, выглядит так, что ПТФЭ (Teflon<sup>®</sup>) является на сегодняшний день лучшим материалом для СПЛ в условиях мокрого снега.



**Теплопроводность** – На мокром снегу этот параметр играет несущественную роль, так как объем воды смазывающей СПЛ более чем достаточен.

### **3.2.2.2 Физико-химическая обработка скользящей поверхности лыж**

Общепризнанное назначение физико-химической обработки СПЛ при условиях мокрого снега – это повышение ее водоотталкивающих свойств. Тем не менее, мои собственные [7] и других авторов [133] измерения показывают очень близкую степень гидрофобности для только что механически обработанной СПЛ из СВМПЭ (например, процикленной) и фторуглеродов. Более того, так как мази скольжения для такого снега довольно мягки и вязки в сравнении со СПЛ, то эти мази (фторуглероды, фторуглеводороды) увеличивают сбор и накопление грязи на СПЛ [48, 58, 149]. Эксперимент, описанный в [58] не был проведен как обычный изолированный тест на скольжение. Планирование и выполнение достоверного теста скольжения лыж в полевых условиях – задача довольно трудная, и этот момент критиковался некоторыми учеными, например: [150]. Но критики забывают, что тест скольжения в работе [58] дополнялся беспристрастным аппаратным контролем загрязнения СПЛ. И этот аппаратный метод подробно описан в [149]. На Рис. 17 изображен этот уникальный аппарат для контроля загрязнения СПЛ.



**Рис. 17 Измерение степени загрязнения скользящей поверхности лыж**

Измерения, проведенные этим аппаратом, показывают четкую зависимость между наличием мази скольжения и загрязнением СПЛ на мокром снегу. То есть, наличие мазей скольжения на СПЛ в условиях мокрого снега производит неожиданный и нежелательный эффект: скольжение ухудшается.

С другой стороны, наплавление мази скольжения дает в некотором роде смесь на внешнем слое СПЛ. Следовательно, в результате такой обработки мы получаем смесь, смесь коллоидного, дисперсного типа из фторуглеродов и углеводов. Очень важно отметить неконтролируемость этого процесса. Мы не можем знать процентное содержание в этой смеси. Каждый сторонник использования мазей скольжения имеет привычку несколько раз наплавлять и счищать эти мази (парафины). После этих процедур совершенно невозможно предсказать концентрацию фторуглеродов на СПЛ. Композиция наружного слоя – terra incognita. Но, учитывая данные из [52, 151-153], гидрофобность смазок с добавками фторуглеродов имеет нелинейную зависимость от процентного содержания (от концентрации) фторуглеродов. Исходя из этого, мы не можем достаточно точно предвидеть результат обработки лыж такими смазками. Иной раз мы можем получить очень высокие водоотталкивающие свойства СПЛ, другой раз – низкие. Следуя вышеизложенному, ясно видно, что нанесение мазей скольжения в условиях теплой погоды и мокрого снега смысла не имеет.

Даже изучение литературы на предмет вопроса смазки полимерных трущихся поверхностей в индустрии не дало примера такой практики. Только в [14] было найдено утверждение о нежелательности применять смазку на полимерных поверхностях. В первую очередь, по причине сбора и накопления грязи.

### ***3.2.2.3 Топография (структура) скользящей поверхности лыж, ее исходное получение и дальнейшее изменение***

Смачивание изучают почти 200 лет. Тем не менее, некоторые принципиальные проблемы еще не решены. Это очень сложная область, область, в которой циркулирует (среди лыжников и биатлонистов) множество поверий и преданий. Поверий, не подкрепленных ни теоретической наукой, ни практическими экспериментами. Одно такое поверье заключается в искажении роли структур на мокром снегу. Поверье говорит об отводе воды (дренировании) со СПЛ при помощи таких

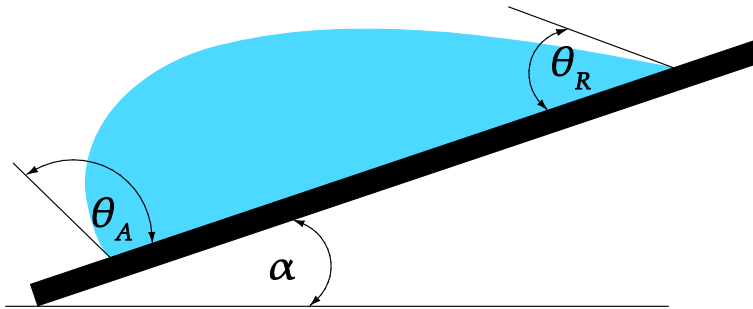
структур, и как результат – улучшение скольжения. Практика и некоторые авторы [54, 154] показывают, что структуры улучшают скольжение в этом случае, но они не пытаются логически объяснить, почему. Однако, следуя классической трибологии, такой эффект наблюдаться не должен: любые структуры (продольные, поперечные и ненаправленные) увеличивают трение в зоне ГДС (Рис. 4) [121, 122, 155]. Об этом ясно написано в [122]: «For almost all combinations of correlation lengths, roughness effects increase the load capacity, increase the friction, and decrease the flow rate = Практически для всех комбинаций соотношений длин, структуры влияют на увеличение грузоподъемности, **увеличение трения** и уменьшение циркуляции смазки». Таким образом, идеальная СПЛ для мокрого снега – это абсолютно гладкая поверхность, если все происходит в условиях постоянного контакта с водой [156, 157]. Тем не менее (и к счастью), так не происходит в реальных лыжах.

Для еще большего усложнения (на первый взгляд) картины, надо сказать, что отдельно взятая степень гидрофобности поверхности скольжения [158] и материала СПЛ [159] не так уж и важна для быстрого скольжения лыж по мокрому снегу. Есть другой, гораздо более важный параметр, это гистерезис смачивания. Происхождение этого параметра демонстрируется на Рис. 18. Так как степень смачиваемости (капиллярное взаимодействие) прямо влияет на движение капли воды по наклонной поверхности, то мы можем найти точку равновесия путем решения уравнения из [160, 161]:

$$\frac{mg(\sin \alpha)}{w} = \gamma_{LV}(\cos \theta_R - \cos \theta_A) \quad (7)$$

Где наступающий (advancing) угол смачивания –  $\theta_A$ , отступающий (receding) угол смачивания –  $\theta_R$  и параметр поверхностного натяжения связан с углом  $\alpha$ , углом, при котором капля начинает скользить вниз по наклонной поверхности. Здесь  $m$  – масса капли воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $w$  – ширина капли в проекции параллельной плоскости и перпендикулярной к градиенту наклона, и  $\gamma_{LV}$  – поверхностное натяжение жидкости (в фазе вода-воздух). Таким образом, нам надо получить  $\Delta \cos$  из уравнения (8) как можно ближе к нулю, и в этом случае одно отдельно взятое значение  $\theta_A$  практически не существенно [162-164].

$$\Delta \cos = \cos \theta_R - \cos \theta_A \quad (8)$$



**Рис. 18** Динамическое смачивание (скольжение) капли воды на твердой поверхности

Для получения степени скользкости поверхности с большей точностью, чем просто  $\Delta \cos$ , я предложил безразмерный фактор смачивания как функция экспериментально определяемых углов смачивания (наступающий и отступающий) [128]:

$$F_w = (\cos \theta_R - \cos \theta_A) \sqrt[3]{(\cos \theta_A + \cos \theta_R + 2) \frac{\sqrt{8 - 2(\cos \theta_A + \cos \theta_R)^2}}{9 - (\cos \theta_A + \cos \theta_R + 1)^2}} \quad (9)$$

Вследствие этого, большинство известных структур для получения супергидрофобности [137, 143, 165] плохо применимы для нужд лыжников в условиях мокрого снега. Они все имеют высокую степень шероховатости, которая должна увеличивать гистерезис смачивания [163] и угол баланса  $\alpha$ , и как результат этого, увеличивать значение  $\mu_{cap}$  из уравнения (6) [128, 166]. А «волосатая» природа таких структур будет увеличивать сбор грязи из снега [19] и следовательно увеличивать величину  $\mu_{dirt}$  из того же уравнения.

На абсолютно гладкой поверхности действует классическая модель смачивания Томаса Юнга (Рис. 19):

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (10)$$

где  $\gamma_{sl}$ ,  $\gamma_{sv}$ , и  $\gamma_{lv}$  межфазные свободные энергии на единицу площади для интерфейсов твердое тело-жидкость, твердое тело-газ и жидкость-газ соответственно.

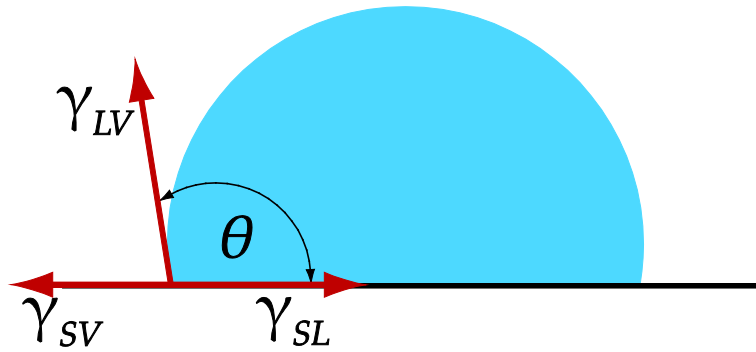


Рис. 19 Томас Юнг модель смачивания

На неровной (шероховатой) поверхности возможно применение модели смачивания Вензеля [167] (Рис. 20):

$$\cos \theta' = \frac{r(\gamma_{SV} - \gamma_{SL})}{\gamma_{LV}} = r \cos \theta \quad (11)$$

где  $r = \frac{\text{Площадь реальной поверхности}}{\text{Площадь проекции поверхности на плоскость}}$ .

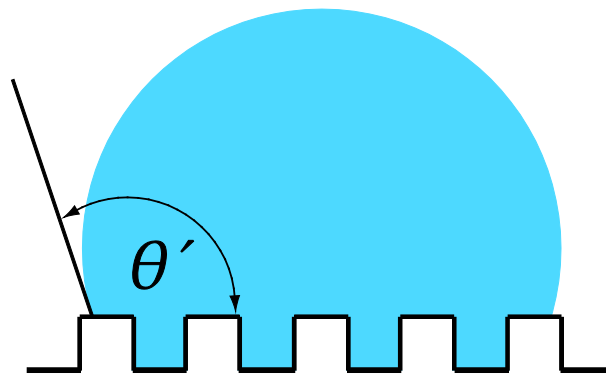


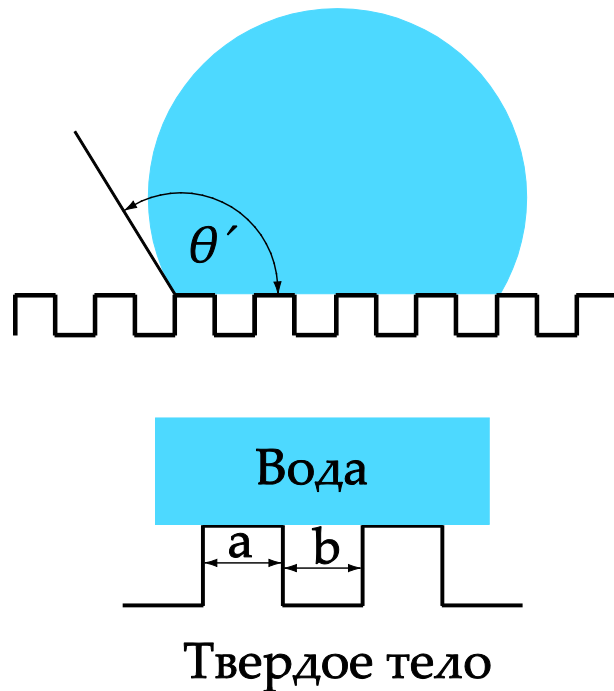
Рис. 20 Модель смачивания Вензеля

Или модели Касси-Бакстера [168] (Рис. 21):

$$\cos \theta' = f \cos \theta + (1-f) \cos 180^\circ = f \cos \theta + f - 1 \quad (12)$$

где  $f$  – доля поверхности, контактирующая с каплей жидкости

$f = \frac{\sum a}{\sum (a+b)}$ ,  $\cos 180^\circ$  – угол смачивания вода-воздух.



**Рис. 21 Касси-Бакстер модель смачивания**

К сожалению, повышение степени шероховатости СПЛ (режим Вензеля) плохо подходит для уменьшения капиллярного сопротивления («подсоса»). Авторы [163, 169] четко доказали зависимость между механизмом Вензеля и гистерезисом смачивания: режим Вензеля ведет к увеличению гистерезиса смачивания, а больший гистерезис ведет к ухудшению скольжения [154, 158, 170-174]. Таким образом, если мы хотим уменьшить трение скольжения лыж при мокром снеге, мы должны получить режим Касси-Бакстера [175] для контакта между СПЛ и снегом. Или, другими словами, получить неоднородную зону смачивания [176-178]. Для этого даже специфическая форма неровностей СПЛ должна быть детально продумана [179].

В реальной жизни мы имеем дело с неидеально выровненной лыжной трассой, а вода, имеющаяся в снегу, и снег имеют вкрапления пузырьков воздуха, какое-то количество воздуха растворено в воде. Это означает, что СПЛ не находится в постоянном контакте с водой, в результате этого появляется возможность выхода воды из структур, и попадания туда воздуха. Этот процесс может создать неоднородные зоны смачивания на СПЛ и тем самым значительно снизить капиллярное сопротивление («подсос»). Следовательно, нам надо создавать такую топографию, такие структуры на СПЛ, вода в которых не будет задерживаться при контакте СПЛ с воздухом, а будет максимально быстро выливаться из них. Таким

образом, внутренние стенки таких структур (углублений) должны быть в высшей степени гидрофобны, так как опорожнение структур зависит как от гистерезиса смачивания, так и от отступающего (receding) угла смачивания [128, 142]. Как было сказано выше, если скольжение (опорожнение структур) капли зависит от гистерезиса смачивания, то есть зависит от обоих углов смачивания, то отрывание капли от поверхности зависит только от отступающего угла смачивания [180]:

$$W_{adh} = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta_R) \quad (13)$$

Структуры должны иметь достаточно отвесные внутренние стенки [141, 154, 181], должны быть ориентированы близко к продольному направлению для избегания увеличения пленки (она уже достаточно толстая) [155] и должны быть достаточно длинными (иметь форму канавок) для минимизации контакта между водой и материалом СПЛ внутри структур.

Говоря кратко, для минимизации капиллярного сопротивления при мокром снеге, мы должны создать на СПЛ такие структуры, которые максимально гладкие (полированные) на микроуровне ( $R_a$  должно быть ниже 50 нм, согласно данным из [127]) и достаточно грубые на макроуровне для создания зон неоднородного смачивания. «Полированные на микроуровне» означает, что внутренние стенки структур и области СПЛ между структурами должны быть максимально гладкими.

## 4 ВЫВОДЫ

По моему мнению, наблюдается ярко выраженная стагнация в области исследований скольжения лыж по снегу. Это происходит как минимум в последние 35 лет. Но в истории можно найти прекрасные примеры целенаправленной научной работы в этой области. Например, ранний Swix<sup>®</sup> (Astra AB) создал новое поколение лыжных мазей, мазей разработанных на научной основе [182]. В 1942-1946 компания провела гигантскую работу. Они создали уникальные исследовательские установки, провели тысячи испытаний, и результат говорит сам за себя: на Олимпийских Играх 1948-го года все шведские золотые медалисты-лыжники использовали новые мази Swix<sup>®</sup>. К сожалению, исследований подобного масштаба давно никто не проводит.

И в Советском Союзе были интересные целевые программы. Например, в конце 60-х, начале 70-х были созданы прекрасные мази держания ВИСТИ. В ходе их разработки был сконструирован, изготовлен и

запатентован прибор (катапульта) для тестирования скольжения и «держания» мазей. Экспериментальной частью руководил мой отец Кузьмин Николай Иванович.

Другой достойный удивления факт это то, что при переходе с деревянных лыж с пластиковые не был пересмотрен процесс подготовки лыж. В первую очередь это относится к горным лыжам, которые сделали такой переход уже в 60-е годы. Лыжники-гонщики просто переняли их манеру работы с лыжами. Пористая и гидрофильная деревянная СПЛ должна была пропитываться каким-либо водоотталкивающим составом для получения удовлетворительного скольжения. Непористая и в высшей степени гидрофобная полиэтиленовая СПЛ, по какой-то необъяснимой причине должна тоже «пропитываться». Просто чудеса! Значит ли это, что и пластиковую лодку надо по-прежнему смолить, чтоб не утонула?

На основе изученной литературы и проведенных экспериментов, ниже будут показаны некоторые рациональные зависимости и будут даны направления дальнейшего развития.

#### **4.1 Материал скользящей поверхности лыж**

В ходе исследований было установлено, что твердость (больше воды для смазки на холодном сухом снегу, меньше загрязнение на снегу мокрым), прочность к истиранию (в первую очередь для условий холодного агрессивного снега) и гидрофобность являются наиболее важными параметрами качественной СПЛ, и могут быть улучшены в ближайшее время следующим образом:

- Чистый без добавок СВМПЭ с максимально возможным молекулярным весом;
- СВМПЭ, усиленный частицами квазикристаллов;
- ПТФЭ с разветвленной (с поперечными связями) молекулярной структурой (для всех видов снега);
- Стандартный ПТФЭ (Teflon<sup>®</sup>) для мокрого снега;
- Для условий холодного сухого снега заменить добавки сажи в СПЛ на интенсивный черный краситель. Это приведет к повышению износостойкости, гидрофобности, уровня поглощения солнечной радиации (увеличение температуры), и к понижению теплопроводности СПЛ. А эти изменения ведут к улучшению скольжения лыж;



## **4.2 Физико-химическая обработка скользящей поверхности лыж**

Если в будущем мы создадим машину, способную создавать любые адекватные структуры на СПЛ, создавать чистые без микроворса (чем грешит штайншлифт) структуры, то полностью отпадет надобность в употреблении мазей скольжения. Тем более при возможном в будущем применении ПТФЭ как материала СПЛ. Ниже приводятся несколько замечаний по данному вопросу:

- Парафины могут применяться исключительно с целью коррекции (выравнивания) неоптимальной топографии СПЛ;
- Фторуглероды могут применяться на недостаточно свежую СПЛ с целью улучшения химии внешнего слоя, особенно для спринтерских дистанций. Не надо забывать, что такой метод может работать только в условиях достаточно чистого снега, иначе интенсивное загрязнение СПЛ быстро ухудшит скольжение;
- Имеет смысл пересмотреть применение мазей скольжения с учетом их высокого риска для здоровья и вреда для окружающей среды. За последние два года (2010-11) появился целый ряд публикаций на эту тему;

## **4.3 Топография (структура) скользящей поверхности лыж, ее исходное получение и дальнейшее изменение**

Топография (структуры, рисунок) весьма важный параметр, напрямую влияющий на скольжение лыж. Путем применения адекватной топографии мы способны сместить кривую на Рис. 6 влево, если мы находимся в зоне I (дефицит талой воды, недостаток смазки) и вправо, если мы в зоне II (избыток воды). Необходимо разрабатывать новые методы, станки и приспособления для точного контроля этого параметра:

- Разработка машин и ручных приспособлений, способных создавать адекватные структуры, но не генерировать нежелательный микроворс;
- Машины и ручные приспособления, способные создавать истинные х-образные и другие непродольные структуры;
- Методы и приборы для создания случайных структур, ограниченных некоторыми заданными параметрами (частично контролируемые). Например: Глубокие случайные структуры, но близкие по направлению к продольным – для мокрого снега.

Очень мелкие (по глубине) случайные структуры, близкие по направлению к поперечным – для сухого холодного снега;

- Методы, машины и ручные приспособления, способные производить кратеро-подобные структуры для холодного и сухого снега.

### Список литературы

1. Colbeck, S.C., *A Review of the Processes That Control Snow Friction*. Monograph 92-21992, Hanover, NH: US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory. 40.
2. Pärssinen, K. and A. Lehtovaara, *Finite element method for the calculation of nominal pressure distribution between ski and track*. Finite Elements in Analysis and Design, 1991. **10**(1): p. 1-8.
3. Erkkilä, J., et al., *Studies of the Mechanical Properties of Cross-Country Skis*. Acta Polytechnica Scandinavica, Applied Physics Series. Vol. 154. 1986, Helsinki: Finnish Academy of Technical Sciences. 24.
4. Clerc, C., R. Gaertner, and P. Trompette, *Computer aided design of skis*. Finite Elements in Analysis and Design, 1989. **5**(1): p. 1-14.
5. Nordt, A.A., G.S. Springer, and L.P. Kollar, *Computing the mechanical properties of alpine skis*. Sports Engineering, 1999. **2**(2): p. 65-84.
6. Suh, N.P. and H.C. Sin, *The genesis of friction*. Wear, 1981. **69**(1): p. 91-114.
7. Kuzmin, L. and M. Tinnsten, *Contact angles on the running surfaces of cross-country skis*, in *The Impact of Technology on Sport*, A. Subic and S. Ujihashi, Editors. 2005, Australasian Sports Technology Alliance Pty Ltd: Melbourne, Australia. p. 318-323.
8. Bergersen, H., K. Bergersen, and T. Flækøy, *Strukturering av Ski = Texturing of Ski (in Norwegian)*. SkiSport, 1994(8): p. 60-60.
9. Åström, K. and O. Norberg, *Förhistoriska och medeltida skidor = Prehistorical and middle age skis (in Swedish)*. Västerbotten, 1984. **2**.
10. Yrjänheikki, E. *The History of Saija*. 2004 [cited 2010 11<sup>th</sup> of January]; Available from: <http://personal.inet.fi/koti/kari.saariniemi/ehistoriikki.html>.
11. Allen, E.J.B., *The culture and sport of skiing: from antiquity to World War II* 2007: University of Massachusetts Press.
12. Bryden, A. *From Tip to Tale - A Brief History of The Development of Ski Equipment*. [World-Wide Web] 1998 28.01.2000 [cited 2010 12<sup>th</sup> of January]; Available from: <http://www.heritageaspen.org/tipto.html>.

13. Seiler, S. *A Reader's Digest Condensed History of Cross-Country Skiing*. [World-Wide Web] 1996 15.08.1996 [cited 2010 10<sup>th</sup> of February]; Available from: <http://home.hia.no/~stephens/skihis.htm>.
14. Briscoe, B.J. and S.K. Sinha, *Wear of polymers*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2002. **216**(6): p. 401-413.
15. Mathia, T., et al. *Topography physicochemistry and wear in sliding of ski soles in regard to rheology of snow*. in *5th International Congress on Tribology, EUROTRIB 89*. 1989. Helsinki, Finland: Elsevier.
16. Mathia, T.G., H. Zahouani, and A. Midol, *Topography, wear and sliding functions of skis*. Int. J. Machine Tools Manufact, 1992. **32**: p. 263–266.
17. Shimbo, M., *The Rate of Sliding and Analysis of Friction on Snow. Part V*. Journal of the Japanese Society of Snow and Ice (SEPPYO), 1960. **22**(5): p. 147-156.
18. Shimbo, M., *Friction on Snow of Ski Soles, Unwaxed and Waxed*, in *Scientific Study of Skiing in Japan*, T.S.o.S. Science, Editor 1971, Hitachi, Ltd: Tokyo, Japan. p. 99-112.
19. Slotfeldt-Ellingsen, D. and L. Torgersen, *Gliegenskaper til skisåler av polyetylen = Glide abilities of polyethylene ski base (in Norwegian)*, 1982, SINTEF: Oslo. p. 62.
20. Langstone, J. *Notes Taken at the Biathlon Canada Olympic Solidarity Seminar* ([http://www.xco.org/coaching/document/t\\_olynot.pdf](http://www.xco.org/coaching/document/t_olynot.pdf)). 2000. 9.
21. Karydas, T. *WHAT IS A WAX AND HOW DOES IT WORK?* [World Wide Web] 2007 [cited 2010 27<sup>th</sup> of March]; Available from: <http://www.dominatorwax.com/faqs.html>.
22. Watanabe, K., *Skiing research in Japan*. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1981. **13**(3): p. 205-209.
23. Ambach, W. and B. Mayr, *Ski Gliding and Water Film*. Cold Regions Science and Technology, 1981. **5**(1): p. 59-65.
24. Erkkilä, J., et al., *A cinematographic method for determination of the kinetic friction of skis on snow*. Report series in Geophysics 1985, Helsinki: University of Helsinki, Department of Geophysics.
25. Hämäläinen, T. and E. Spring, *The influence of snow hardness on ski friction*. Commentationes Physico-Mathematicae, ed. E. Spring 1986, Helsinki: Societas scientiarum Fennica. 17.
26. Fauve, M., et al., *Influence of snow and weather characteristics on the gliding properties of skis*, in *Science and Skiing III*, E. Müller, et al., Editors. 2005, Meyer & Meyer Sport. p. 401-410.

27. Kuroiwa, D., *The kinetic friction on snow and ice*. Journal of Glaciology, 1977. **19**(81): p. 141-152.
28. Colbeck, S.C., *The kinetic friction of snow*. Journal of Glaciology, 1988. **34**(116): p. 78-86.
29. Spring, E., *A method for testing the gliding quality of skis*. Tribologia, 1988. **7**(1): p. 9-14.
30. Bowden, F.P. and T.P. Hughes, *The Mechanism of Sliding on Ice and Snow*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1939. **172**(949): p. 280-298.
31. Tusima, K. and Z. Yosida, *Melting of Ice by Friction*. Low Temperature Science, Series A, 1969. **27**: p. 17-30.
32. Oksanen, P. and J. Keinonen, *The mechanism of friction of ice*. Wear, 1982. **78**(3): p. 315-324.
33. Balakin, V.A. and O.V. Pereverzeva, *Frictional heating and melting of sliding surfaces*. Journal of Friction and Wear c/c Trenie i Iznos, 1994. **15**(4): p. 118-131.
34. Schipper, D.J., *Transitions in the Lubrication of Concentrated Contacts*, 1988, University of Twente: Enschede, The Netherlands. p. 194.
35. Gelinck, E.R.M. and D.J. Schipper, *Calculation of Stribeck curves for line contacts*. Tribology International, 2000. **33**(3-4): p. 175-181.
36. Faraon, I.C., *Mixed Lubricated Line Contacts*, 2005, University of Twente: Enschede, The Netherlands. p. 180.
37. Tusima, K. *The temperature dependence of hardness of snow*. in *Snow Mechanics Symposium*. 1975. Grindelwald, Bernese Oberland, Switzerland: International Association of Hydrological Sciences.
38. Slotfeldt-Ellingsen, D. and L. Torgersen, *Water in ice: influence on friction*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1983. **16**(9): p. 1715-1719.
39. Glenne, B., *Sliding friction and boundary lubrication of snow*. Journal of tribology, 1987. **109**(4): p. 614-617.
40. Itagaki, K., N.P. Huber, and G.E. Lemieux, *Dynamic Friction of a Metal Runner on Ice. 1. Model Sled Test*. CRREL Report 89-141989, Hanover, NH: US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory. 16.
41. Buhl, D., M. Fauve, and H. Rhyner, *The kinetic friction of polyethylen on snow: the influence of the snow temperature and the load*. Cold Regions Science and Technology, 2001. **33**(2-3): p. 133-140.

42. Lehtovaara, A., *Kinetic Friction between Ski and Snow*. Acta polytechnica Scandinavica, Mechanical engineering series. Vol. 93. 1989, Helsinki: Finnish Academy of Technology. 52.
43. Colbeck, S.C., *A Review of the Friction of Snow*, in *Physics of Sliding Friction*, B.N.J. Persson and E. Tosatti, Editors. 1996, Kluwer Academic Publishers. p. 275-292.
44. Pihkala, P. and E. Spring, *Determination of the Contact Area Between Ski and Snow Using a Simple Thermal Conductivity Meter*. Report series in Geophysics 1986, Helsinki: University of Helsinki, Department of Geophysics. 14.
45. Bäumle, L., *Sliding Friction of Polyethylene on Snow and Ice*, 2006, Swiss Federal Institute of Technology: Zurich. p. 105.
46. Bäumle, L., et al., *Sliding friction of polyethylene on snow and ice: Contact area and modeling*. Cold Regions Science and Technology, 2007. **47**(3): p. 276-289.
47. Fauve, M., et al., *Putting snow knowledge into the development of winter sports equipment*. Sports Technology, 2008. **1**(2-3): p. 145-151.
48. Kuzmin, L. and M. Tinnsten, *The contamination, wettability and gliding ability of ski running surfaces*, in *Science and Nordic Skiing*, V. Linnamo, P.V. Komi, and E. Müller, Editors. 2007, Meyer & Meyer Sport: London, UK. p. 286-292.
49. Shimbo, M., *The Mechanism of Sliding on Snow*, in *Helsinki Meeting 1960*, Report of International Association of Hydrology Commission of Snow and Ice: Helsinki, Finland. p. 101-106.
50. Kurtz, S.M., *The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement* 2004, Boston: Academic Press INC.
51. Fischer, J., G.M. Wallner, and A. Pieber, *Spectroscopical Investigation of Ski Base Materials*. Macromolecular Symposia, 2008. **265**(1): p. 28-36.
52. Rogowski, I., et al., *Typology of the gliding waxes in cross-country skiing: Comparison between classifications based on the chemical composition and those based on the physical and physicochemical properties*. Cold Regions Science and Technology, 2005. **43**(3): p. 140-149.
53. Street, G.M., *Technological advances in cross-country ski equipment*. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1992. **24**(9): p. 1048-1054.
54. Moldestad, D.A., *Some Aspects of Ski Base Sliding Friction and Ski Base Structure*, in *NTNU Department of structural engineering* 1999, Norwegian University of Science and Technology: Trondheim. p. 198.

55. Moldestad, D.A. and S. Løset, *The Ski base Structure Analyser (SSA). Modeling, identification and control*, 2003. **24**(1): p. 15-26.
56. Jordan, S.E. and C.A. Brown, *Comparing texture characterization parameters on their ability to differentiate ground polyethylene ski bases*. *Wear*, 2006. **261**(3-4): p. 398-409.
57. Kuzmin, L., *Investigation of the most essential factors influencing ski glide*, in *Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Computer Aided Design* 2006, Luleå University of Technology: Luleå. p. 26.
58. Kuzmin, L. and M. Tinnsten, *Dirt absorption on the ski running surface - quantification and influence on the gliding ability*. *Sports Engineering*, 2006. **9**(3): p. 137-146.
59. Bowden, F.P., *Friction on Snow and Ice*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1953. **217**(1131): p. 462-478.
60. Butkovich, T.R., *Hardness of Single Ice Crystals*. *The American Mineralogist*, 1958. **43**: p. 48-57.
61. Khrushchov, M.M. and E.S. Berkovich, *A Study of the Hardness of Ice* 1970, Hanover, NH, USA: U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. 48.
62. Barnes, P., D. Tabor, and J.C.F. Walker, *The Friction and Creep of Polycrystalline Ice*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1971. **324**(1557): p. 127-155.
63. Broz, M.E., R.F. Cook, and D.L. Whitney, *Microhardness, toughness, and modulus of Mohs scale minerals*. *American Mineralogist*, 2006. **91**(1): p. 135-142.
64. Automation Creations Inc. *MatWeb*. [World-Wide Web] 1996 [cited 2010 15th of March]; Available from: [www.matweb.com](http://www.matweb.com).
65. Epifanov, V.P., *Rupture and dynamic hardness of ice*. *Doklady Physics*, 2004. **49**(2): p. 86-89.
66. Eriksson, R., *Medens friktion mot snö och is = Friction of runner upon snow and ice (in Swedish) - II. Friktion vid rörelse. Glidfriktion*. *Norrlands skogsvårdförbunds tidskrift*, 1949(1): p. 281-317.
67. Klein, G.J., *The Snow Characteristics of Aircraft Skis*, 1947, National research council of Canada Ottawa (Ontario), div. of Mechanical Engineering. p. 17.
68. Teichert, C., *Corrasion by wind-blown snow in polar regions*. *American Journal of Science*, 1939. **237**(2): p. 146-148.

69. Stein, H.L., *Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)*. Engineered Materials Handbook. Vol. 2. 1999, Ohio 44073, USA: ASMInternational®. 167-171.
70. Cuckler, J.M., *Factors Influencing the Limitations of Polyethylene*. Orthopedics, 1997. **20**(9): p. 761-762.
71. Kaufman, L., et al., *Effects of Gamma Radiation Sterilization on UHMWPE*. Group, 1998.
72. Edidin, A.A. and S.M. Kurtz, *Development and validation of the small punch test for UHMWPE used in total joint replacements*. Key Engineering Materials (Switzerland), 2001. **198**: p. 1-40.
73. Khedkar, J., I. Negulescu, and E.I. Meletis, *Sliding wear behavior of PTFE composites*. Wear, 2002. **252**(5-6): p. 361-369.
74. Petrenko, V.F., *The Effect of Static Electric Fields on Ice Friction*. Journal of Applied Physics, 1994. **76**(2): p. 1216-1219.
75. Petrenko, V.F. and S.C. Colbeck, *Generation of electric fields by ice and snow friction*. Journal of Applied Physics, 1995. **77**(9): p. 4518-4521.
76. Petrenko, V.F., *Electromechanical Phenomena in Ice*. Special Report 96-21996, Hanover, NH: U.S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory. 30.
77. Colbeck, S.C., *Electrical charging of skis gliding on snow*. Medicine and Science in Sports and Exercise, 1995. **27**(1): p. 136-141.
78. Warren, G.C., S.C. Colbeck, and F.E. Kennedy, *Thermal Response of Downhill Skis*, 1989, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory: Hanover, NH, USA.
79. Colbeck, S.C., *Bottom temperatures of skating skis on snow*. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1994. **26**(2): p. 258-262.
80. Colbeck, S.C. and D.K. Perovich, *Temperature effects of black versus white polyethylene bases for snow skis*. Cold Regions Science and Technology, 2004. **39**(1): p. 33-38.
81. Werder, T., et al. *Water-Carbon Interactions: Potential Energy Calibration Using Experimental Data*. in *2003 NSTI Nanotechnology Conference & Trade Show*. 2003. San Francisco, California, U.S.A.
82. Brunet, P., et al., *Comparative study of microstructural and tribological properties of sintered, bulk icosahedral samples*. Materials Science and Engineering A, 2000. **294-296**: p. 74-78.
83. Persson, B.N.J., et al., *Contact Mechanics, Friction and Adhesion with Application to Quasicrystals*, 2007. p. 269-306.

84. Anderson, B.C., et al., *Al-Cu-Fe quasicrystal/ultra-high molecular weight polyethylene composites as biomaterials for acetabular cup prosthetics*. *Biomaterials*, 2002. **23**(8): p. 1761-1768.
85. Schwartz, C.J., S. Bahadur, and S.K. Mallapragada, *Effect of crosslinking and Pt-Zr quasicrystal fillers on the mechanical properties and wear resistance of UHMWPE for use in artificial joints*. *Wear*, 2007. **263**(7-12): p. 1072-1080.
86. Palosuo, E., et al., *Lumen kitkan vaikutus suksen luistoon = The effect of friction between snow and skis (in Finnish)*. Report series in Geophysics, ed. E. Palosuo 1977, Helsinki: University of Helsinki, Department of Geophysics.
87. Saito, H., K. Takai, and G. Yamauchi, *Water- and ice-repellent coatings*. *Surface Coatings International Part B: Coatings Transactions*, 1997. **80**(4): p. 168-171.
88. Palosuo, E., et al., *Lumen ja suksenpohjamuovien välisen kitkan mittauksia = Measurements of friction between snow and ski running surfaces (in Finnish)*. Report series in Geophysics 1979, Helsinki: University of Helsinki. 42.
89. Bowden, F.P., *Friction on Snow and Ice and the Development of some Fast-Running Skis*. *Nature*, 1955. **176**(4490): p. 946-947.
90. Outwater, J.O., *On the friction of skis*. *Medicine and Science in Sports*, 1970. **2**(4): p. 231-234.
91. Badey, J.P., et al., *Influence of chemical and plasma treatments on the adhesive properties of PTFE with an epoxy resin*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1996. **16**(3): p. 173-178.
92. Hopp, B., et al., *Comparative tensile strength study of the adhesion improvement of PTFE by UV photon assisted surface processing*. *Applied Surface Science*, 2002. **186**(1-4): p. 80-84.
93. Oshima, A., et al., *Radiation induced crosslinking of polytetrafluoroethylene*. *Radiation Physics and Chemistry*, 1995. **45**(2): p. 269-273.
94. Oshima, A., et al., *Chemical structure and physical properties of radiation-induced crosslinking of polytetrafluoroethylene*. *Radiation Physics and Chemistry*, 2001. **62**(1): p. 39-45.
95. Setogawa, A., et al., *Development of Cross-linked PTFE and Applied Products*. *Hitachi Cable Review*, 2002. **21**: p. 83-88.
96. Daae, H.L., et al., *Kjemisk eksponering og effekter på luftveiene blant profesjonelle skismørere = Chemical exposure and effects on the*



- respiratory system among professional ski technicians (in Norwegian)*, 2009, Statens arbeidsmiljøinstitutt (STAMI). p. 33.
97. Freberg, B.I., et al., *Occupational Exposure to Airborne Perfluorinated Compounds during Professional Ski Waxing*. Environmental Science & Technology, 2010. **44**(19): p. 7723-7728.
  98. Plassmann, M.M. and U. Berger, *Trace Analytical Methods for Semifluorinated n-Alkanes in Snow, Soil, and Air*. Analytical Chemistry, 2010. **82**(11): p. 4551-4557.
  99. Plassmann, M.M., *Environmental occurrence and fate of semifluorinated n-alkanes and perfluorinated alkyl acids present in ski waxes*, in *Department of Applied Environmental Science* 2011, Stockholm University: Stockholm, Sweden. p. 35.
  100. Bowden, F.P. and D. Tabor, *The friction and lubrication of solids* 2001: Oxford University Press, USA. 424.
  101. Bluhm, H., T. Inoue, and M. Salmeron, *Friction of ice measured using lateral force microscopy*. Physical Review B, 2000. **61**(©2000 The American Physical Society): p. 7760-7765.
  102. Evans, D.C.B., J.F. Nye, and K.J. Cheeseman, *The Kinetic Friction of Ice*. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1976. **347**(1651): p. 493-512.
  103. Shimbo, M., *Measurements of the Defacement of Skiing Wax through the Radioactive Sulphur*. Journal of the Japanese Society of Snow and Ice (SEPPYO), 1957. **19**(2): p. 33-35.
  104. Karlöf, L. and L.T. Axell, *On dry lubricants in ski waxes*, in *Technical Note* 2005, Swix Sport AS: Lillehammer, Norway. p. 4.
  105. Geissbühler, U., *Regarding "porosity" in UHMWPE skibases*, L. Kuzmin, Editor 2006: Worb. p. 1.
  106. Oral, E., et al., *Diffusion of vitamin E in ultra-high molecular weight polyethylene*. Biomaterials, 2007. **28**(35): p. 5225-5237.
  107. Karlöf, L., L.T. Axell, and D. Slotfeldt-Ellingsen, *Why is ice and snow slippery? The Tribo-physics of skiing*, in *Technical Note* 2005, Swix Sport AS: Lillehammer, Norway. p. 35.
  108. Traverso, E., *Synthesis of perfluoroalkane mixtures and their application as sliding agents for skis*. Chemistry and Industry, 1986: p. 523-525.
  109. Kuzmin, L. and M. Tinnsten, *Hot Glide Wax Treatment and the Hardness of the Ski Running Surface*, in *The Engineering of Sport 7, Vol. 2*, M. Estivalet and P. Brisson, Editors. 2008, Springer-Verlag France: Paris. p. 135-141.

110. Toko USA. *Toko Thermo Bag*. [World-Wide Web] 2006 18th of November 2006 [cited 2010 20<sup>th</sup> of March]; Available from: [http://www.tokous.com/thermo\\_bag.htm](http://www.tokous.com/thermo_bag.htm).
111. Eriksson, R., *Medens friktion mot snö och is = Friction of runner upon snow and ice (in Swedish) - I. Grundläggande betraktelser och friktion vid igångsättning*. Norrlands skogsvårdförbunds tidskrift, 1949(1): p. 125-146.
112. Shimbo, M., *The Rate of Sliding and the Analysis of Friction on Snow. Part IV*. Journal of the Japanese Society of Snow and Ice (SEPPYO), 1960. **22**(4): p. 113-119.
113. Naturskyddsföreningen, *Fluorerade miljögifter i impregneringsmedel = Fluorinated pollutants in the impregnating remedies (in Swedish)*, H. Norin and P.-E. Schulze, Editors. 2007: Stockholm. p. 26.
114. Arito, H. and R. Soda, *Pyrolysis products of polytetrafluoroethylene and polyfluoroethylenepropylene with reference to inhalation toxicity*. Annals of Occupational Hygiene, 1977. **20**(3): p. 247-255.
115. Kemikalieinspektionen, *Perfluorinated substances and their uses in Sweden*, in *KemI Report2006*, Swedish Chemicals Agency: Stockholm. p. 60.
116. Dahlqvist, M., et al., *Exposure to Ski-Wax Smoke and Health Effects in Ski Waxers*. Applied Occupational & Environmental Hygiene, 1992. **7**(10): p. 689-693.
117. Hoffman, M.D., P.S. Clifford, and B. Varkey, *Acute effects of ski waxing on pulmonary function*. Medicine & Science in Sports & Exercise, 1997. **29**(10): p. 1379-1382.
118. Knöpfli, B., et al., *Acute deterioration of the CO diffusion capacity following exposure to ski-wax vapors*. Schweizerische Rundschau für Medizin PRAXIS, 1992. **81**(27-28): p. 884-8877.
119. Strøm, E. and O. Alexandersen, *Lungeskade i forbindelse med smøring av ski = Polymer-fume fever and pulmonary oedema due to ski wax (in Norwegian)*. Tidsskr Nor Laegeforen, 1990. **110**(28): p. 3614-3616.
120. Bracco, D. and J.-B. Favre, *Pulmonary Injury After Ski Wax Inhalation Exposure*. Annals of Emergency Medicine, 1998. **32**(5): p. 616-619.
121. Patir, N. and H.S. Cheng, *An Average Flow Model for Determining Effects of Three-Dimensional Roughness on Partial Hydrodynamic Lubrication*. ASME, Transactions, Journal of Lubrication Technology, 1978. **100**: p. 12-17.
122. Sun, D.C., *On the Effects of Two-Dimensional Reynolds Roughness in Hydrodynamic Lubrication*. Proceedings of the Royal Society of London.

- Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1978. **364**(1716): p. 89-106.
123. Hu, Y.-Z. and D. Zhu, *A Full Numerical Solution to the Mixed Lubrication in Point Contacts*. Journal of Tribology, 2000. **122**(1): p. 1-9.
  124. Li, W.-L., C.-I. Weng, and C.-C. Hwang, *Effects of roughness orientations on thin film lubrication of a magnetic recording system*. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995. **28**(6): p. 1011-1021.
  125. Wang, X., et al., *The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for the transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed*. Tribology International, 2001. **34**(10): p. 703-711.
  126. Bäurle, L., et al., *Sliding friction of polyethylene on ice: tribometer measurements*. Tribology Letters, 2006. **24**(1): p. 77-84.
  127. Strausky, H., et al., *Sliding plastics on ice: fluorescence spectroscopic studies on interfacial water layers in the  $\mu\text{m}$  thickness regime*. Applied Physics B: Lasers & Optics, 1998. **66**(5): p. 599.
  128. Kuzmin, L., P. Carlsson, and M. Tinnsten, *The relationship between the type of machining of the ski running-surface and its wettability and capillary drag*. Sports Technology, 2010. **3**(2): p. 121-130.
  129. Ducret, S., et al., *Friction and abrasive wear of UHMWPE sliding on ice*. Wear, 2005. **258**(1-4): p. 26-31.
  130. Yekta-Fard, M. and A.B. Ponter, *Surface Treatment and its Influence on Contact Angles of Water Drops Residing on Teflon and Copper*. The Journal of Adhesion, 1985. **18**(3): p. 197-205.
  131. Sturesson, P., *Friction characteristics between ski base and ice - fundamental lab scale tests and practical implications*, in *Department of Engineering Sciences, Division of Tribomaterials 2008*, Uppsala University: Uppsala. p. 42.
  132. Good, R.J. and E. Elbing, *Generalization of Theory for Estimation of Interfacial Energies*. Industrial & Engineering Chemistry, 1970. **62**(3): p. 54-78.
  133. Janczuk, B. and T. Biallopiotrowicz, *Surface free-energy components of liquids and low energy solids and contact angles*. Journal of Colloid and Interface Science, 1989. **127**(1): p. 189-204.
  134. Nishino, T., et al., *The Lowest Surface Free Energy Based on  $-\text{CF}_3$  Alignment*. Langmuir, 1999. **15**(13): p. 4321-4323.
  135. Coulson, S.R., et al., *Super-Repellent Composite Fluoropolymer Surfaces*. The Journal of Physical Chemistry B, 2000. **104**(37): p. 8836-8840.

136. Miwa, M., et al., *Effects of the Surface Roughness on Sliding Angles of Water Droplets on Superhydrophobic Surfaces*. Langmuir, 2000. **16**(13): p. 5754-5760.
137. Onda, T., et al., *Super-Water-Repellent Fractal Surfaces*. Langmuir, 1996. **12**(9): p. 2125-2127.
138. Sun, T., et al., *Bioinspired Surfaces with Special Wettability*. Accounts of Chemical Research, 2005. **38**(8): p. 644-652.
139. Brown, C.A. and G. Savary, *Describing Ground Surface Texturing Using Contact Profilometry and Fractal Analysis*. Wear, 1991. **141**(2): p. 211-226.
140. Blossey, R., *Self-cleaning surfaces—virtual realities*. Nature Materials, 2003. **2**: p. 301-306.
141. Li, X., D. Reinhoudt, and M. Crego-Calama, *What do we need for a superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces*. Chemical Society Reviews, 2007. **36**(8): p. 1350-1368.
142. Öner, D. and T.J. McCarthy, *Ultrahydrophobic Surfaces. Effects of Topography Length Scales on Wettability*. Langmuir, 2000. **16**(20): p. 7777-7782.
143. Nakajima, A., K. Hashimoto, and T. Watanabe, *Recent Studies on Super-Hydrophobic Films*. Monatshefte für Chemie / Chemical Monthly, 2001. **132**(1): p. 31-41.
144. Fresnais, J., L. Benyahia, and F. Poncin-Epaillard, *Dynamic (de)wetting properties of superhydrophobic plasma-treated polyethylene surfaces*. Surface and Interface Analysis, 2006. **38**(3): p. 144-149.
145. Fresnais, J., et al., *Plasma-Treated Superhydrophobic Polyethylene Surfaces: Fabrication, Wetting and Dewetting Properties*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**: p. 447-467.
146. Wu, Y., et al., *Mechanical durability of ultra-water-repellent thin film by microwave plasma-enhanced CVD*. Thin Solid Films, 2004. **457**(1): p. 122-127.
147. Yekta-Fard, M. and A.B. Ponter, *Factors affecting the wettability of polymer surfaces*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1992. **6**: p. 253-277.
148. Sandford, G., *Perfluoroalkanes*. Tetrahedron, 2003. **59**(4): p. 437-454.
149. Kuzmin, L. and M. Tinnsten, *Estimation of dirt attraction on running surfaces of cross-country skis*, in *The Impact of Technology on Sport II*, A. Subic, S. Ujihashi, and F.K. Fuss, Editors. 2007, Taylor & Francis Group: London, UK. p. 851- 856.

150. Brooks, M., *Getting a grip on slip science*. New Scientist, 2009. **204**(2739): p. 49-51.
151. Mukerjee, P., *Fluorocarbon-hydrocarbon interactions in micelles and other lipid assemblies, at interfaces, and in solutions*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, 1994. **84**(1): p. 1-10.
152. Nishino, T., et al., *Surface properties and structures of diblock copolymer and homopolymer with perfluoroalkyl side chains*. Journal of Colloid and Interface Science, 2005. **283**(2): p. 533-538.
153. Rogowski, I., et al., *Influence of fluorine-based additive content on the physical and physicochemical properties of ski gliding wax*. Cold Regions Science and Technology, 2007. **49**(2): p. 145-150.
154. Colbeck, S.C., *Capillary bonding of wet surfaces - the effects of contact angle and surface roughness*. Journal of Adhesion Science and Technology, 1997. **11**(3): p. 359-371.
155. Hu, J., *Experimental and theoretical investigation of roughness effects on thin laminar fluid films*, in University of Toronto 1997, National Library of Canada = Bibliothèque nationale du Canada: Ottawa. p. 173.
156. Extrand, C.W. and Y. Kumagai, *An Experimental Study of Contact Angle Hysteresis*. Journal of Colloid and Interface Science, 1997. **191**(2): p. 378-383.
157. Extrand, C.W. and Y. Kumagai, *Liquid Drops on an Inclined Plane: The Relation between Contact Angles, Drop Shape, and Retentive Force*. Journal of Colloid and Interface Science, 1995. **170**(2): p. 515-521.
158. Extrand, C.W. and A.N. Gent, *Retention of liquid drops by solid surfaces*. Journal of Colloid and Interface Science, 1990. **138**(2): p. 431-442.
159. Tysoe, W.T. and N.D. Spencer, *Tribology's Olympic research*. Tribology & Lubrication Technology (TLT), 2010(4): p. 56.
160. Frenkel, Y.I., *On the behaviour of liquid drops on a solid surface*. J. Exptl. Theoret. Phys. (USSR), 1948. **18**(7): p. 659-667.
161. Furmidge, C.G.L., *Studies at phase interfaces. I. The sliding of liquid drops on solid surfaces and a theory for spray retention*. Journal of Colloid and Interface Science, 1962. **17**(3): p. 309-324.
162. Dammer, S.M. and D. Lohse, *Gas Enrichment at Liquid-Wall Interfaces*. Physical Review Letters, 2006. **96**(20): p. 206101.
163. Gao, L. and T.J. McCarthy, *Contact Angle Hysteresis Explained*. Langmuir, 2006. **22**(14): p. 6234-6237.
164. Gao, L. and T.J. McCarthy, *A Perfectly Hydrophobic Surface ( $\theta_A/\theta_R = 180^\circ/180^\circ$ )*. J. Am. Chem. Soc., 2006. **128**(28): p. 9052-9053.

165. Gillner, A., et al. *Laser Micro and Nano Structuring for Functional Surfaces on Polymer Parts*. in *Fourth International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing*. 2007. Munich, Germany: AT-Fachverlag GmbH, Stuttgart, Germany.
166. Choi, W., et al., *A modified Cassie-Baxter relationship to explain contact angle hysteresis and anisotropy on non-wetting textured surfaces*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009. **339**(1): p. 208-216.
167. Wenzel, R.N., *Surface roughness and contact angle*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1936. **28**: p. 988-994.
168. Cassie, A.B.D. and S. Baxter, *Wettability of porous surfaces*. *Transactions of the Faraday Society*, 1944. **40**: p. 546-551.
169. Whyman, G., E. Bormashenko, and T. Stein, *The rigorous derivation of Young, Cassie-Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon*. *Chemical Physics Letters*, 2008. **450**(4-6): p. 355-359.
170. Chen, W., et al., *Ultrahydrophobic and Ultralyophobic Surfaces: Some Comments and Examples*. *Langmuir*, 1999. **15**(10): p. 3395-3399.
171. De Souza, E.J., et al., *Effect of Contact Angle Hysteresis on the Measurement of Capillary Forces*. *Langmuir*, 2008. **24**(4): p. 1391-1396.
172. Yoshimitsu, Z., et al., *Effects of Surface Structure on the Hydrophobicity and Sliding Behavior of Water Droplets*. *Langmuir*, 2002. **18**(15): p. 5818-5822.
173. Kako, T., et al., *Adhesion and sliding of wet snow on a super-hydrophobic surface with hydrophilic channels*. *Journal of Materials Science*, 2004. **39**(2): p. 547-555.
174. Kako, T., et al., *Adhesion and Sliding of Snow on Hydrophobic Solid Surface*. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2002. **110**(3): p. 186-192.
175. Patankar, N.A., *Transition between Superhydrophobic States on Rough Surfaces*. *Langmuir*, 2004. **20**(17): p. 7097-7102.
176. Marmur, A., *Wetting on Hydrophobic Rough Surfaces: To Be Heterogeneous or Not To Be?* *Langmuir*, 2003. **19**(20): p. 8343-8348.
177. Marmur, A., *Super-hydrophobicity fundamentals: implications to biofouling prevention*. *Biofouling*, 2006. **22**(2): p. 107-115.
178. Marmur, A., *The Lotus Effect: Superhydrophobicity and Metastability*. *Langmuir*, 2004. **20**(9): p. 3517-3519.
179. Extrand, C.W., *Model for Contact Angles and Hysteresis on Rough and Ultraphobic Surfaces*. *Langmuir*, 2002. **18**(21): p. 7991-7999.

180. Gao, L. and T.J. McCarthy, *Teflon is Hydrophilic. Comments on Definitions of Hydrophobic, Shear versus Tensile Hydrophobicity, and Wettability Characterization*. Langmuir, 2008. **24**(17): p. 9183-9188.
181. Colbeck, S.C., *Capillary bonding of wet surfaces*. Surface and Coatings Technology, 1996. **81**(2): p. 209-214.
182. Swix Sport AS, *60<sup>th</sup> Anniversary for SWIX<sup>®</sup>*, 2006.