

DOI: 10.32864/polymmattech-2019-5-3-6-23

УДК 678.01:536.4:621.002.3

СЛОЙ СКОЛЬЖЕНИЯ БЕГОВЫХ ПЛАСТИКОВЫХ ЛЫЖ: СПЕЦИФИКА УСЛОВИЙ ТРЕНИЯ, ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК (ОБЗОР)

В. Н. АДЕРИХА⁺, С. С. ПЕСЕЦКИЙ

Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, отдел технологии полимерных композитов, ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь

Систематизированы результаты исследований и разработок по слою скольжения беговых пластиковых лыж (ССЛ). Особое внимание уделено анализу специфики условий трения ССЛ по снегу, текущему состоянию и перспективам исследований и разработок в этой области. Проанализированы факторы, определяющие коэффициент трения и износостойкость ССЛ при трении по снегу. Приведенные сведения об особенностях процессов трения в паре ССЛ–снег, на основе прежде всего различных модификаций полиэтилена, и конкурентном влиянии наполнителей на гидрофобность, трибологические, электро- и теплофизические характеристики полимерной основы свидетельствуют о сложности объекта исследования и многофакторности явлений, определяющих эксплуатационные характеристики в реальных условиях. В качестве перспективных направлений выделены работы по повышению гидрофобности ССЛ за счет применения фторсодержащих полимеров, сочетания химического модифицирования поверхности ПЭ перфторированными и другими соединениями олигомерной и полимерной природы с методами управления микро(нано) топографией и текстурированием поверхности в рамках концепции создания супергидрофобных антифрикционных поверхностей. Охарактеризована специфика подбора и нанесения смазок (мазей) на поверхность ССЛ, а также обеспечения его адгезионного соединения с пререпгом.

Ключевые слова: пластиковая лыжа, слой скольжения лыжи, сердечник, облицовочный слой, препрег, трение по снегу, гидрофобность.

THE SLIDING BASE OF CROSS-COUNTRY PLASTIC SKIS: THE SPECIFICS OF FRICTION CONDITIONS, THE CURRENT STATE AND PROSPECTS OF RESEARCH AND DEVELOPMENT (REVIEW)

V. N. ADERIKHA⁺, S. S. PESETSKII

V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Department of Technology of Polymer Composites, Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus

The results of research and development of the sliding base of cross-country plastic skis (SB) are systematized. Particular attention is paid to the analysis of the specific conditions of SB friction on snow, the current state and prospects of research and development in this area. The factors determining the coefficient of friction and wear resistance of the SB during friction on snow are analyzed. The given information about the features of friction processes in a pair of SB-snow, based primarily on various modifications of polyethylene and competitive influence of fillers on hydrophobicity, tribological, electro- and thermophysical characteristics of the polymer base indicate the complexity of the object of study and multifactorial phenomena that determine performance in real conditions. Research aimed on increase of hydrophobicity of SB by applica-

⁺ Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: vnad@tut.by

tion of fluorinated polymers, combination of chemical modification of PE surface by perfluorinated and other compounds of oligomeric and polymeric nature with methods of control of micro(nano) topography and texturing of the SB surface within the concept of superhydrophobic antifriction surfaces are indicated as perspective directions of development. The specificity of the selection and application of lubricants (greases) on the surface of the SB, as well as ensuring its adhesion to the prepreg is characterized.

Keywords: plastic ski, ski sliding base, core, prepreg, friction on snow, hydrophobicity.

Введение

Конструкция и технология изготовления лыж претерпели в последние 50–70 лет бурную эволюцию, в ходе которой произошел переход от цельнодеревянной (ясень, ель, осина, липа, лиственница и др.), к клеевой (слоистой) конструкции лыж, отдельные слои которой — оболочка (верхний облицовочный слой), сердечник, включающий носок - переднюю часть лыжи, пятку — заднюю ее часть, и слой скольжения выполняют специфические функции и изготавливаются из разных материалов [1]. Сердечник — это все то, что расположено между нижним слоем скольжения и верхним облицовочным слоем. Сердечник определяет такие характеристики лыжи как вес и жесткость. Спортсмены для достижения высоких результатов стараются использовать самые легкие лыжи. В настоящее время применяют четыре основных вида сердечников лыж: полностью деревянный (для самых простых и недорогих лыж любительского уровня); деревянный с воздушными каналами (Airchanel), для любителей; из вспененных полимерных материалов (очень легкий тип сердечника для продвинутых любителей и тренировок спортсменов); с сотовой структурой (Nomex Core) — самый легкий на сегодняшний день тип, используемый в спортивных моделях лыж. Для обеспечения необходимой жесткости в лыже сердечник, посредством армирующего препрега (представляющего собой тканевую основу на базе стекло- угле- базальтовых или комбинированных волокон, пропитанных клеевым термореактивным связующим) соединен с верхним облицовочным слоем и нижним слоем скольжения, который ответственен за «ходовые» качества лыж. Верхний облицовочный слой изготавливают обычно прозрачным в виде тонкого листа (ленты) толщиной $\approx 0,3-0,5$ мм и на его внутреннюю поверхность, прилегающую к препрегу, через слой светопрозрачного грунта наносят требуемый рисунок, а наружную поверхность покрывают тонким слоем водоотталкивающего лака. Носок и пятку приформовывают к сердечнику, как правило литьем под давлением, и адгезионно соединяют с ним, верхним облицовочным слоем и слоем скольжения лыж (ССЛ) при спрессовывании всех элементов в специальной технологической оснастке (прессформе). При этом на каждый типоразмер лыж изготавливают отдельную прессформу. Адгезионное (клеевое) соединение верхнего облицовочного слоя и ССЛ осуществляется на боковых стенках лыж посредством армирующего препрега, которые после изготовления лыжи подвергаются механической обработке (зачистке).

В современных беговых лыжах слой скольжения изготавливают главным образом в виде тонкого (толщина $\approx 1-2$ мм) листа (ленты, полосы пластика в нижней части лыжи, идущей от носка лыжи до пятки) из различных модификаций полиэтилена (ПЭ) высокой плотности, преимущественно сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ, молекулярный вес $1,5-10,5 \cdot 10^6$ Да). В нижней части ССЛ изготавливают желоб — углубление посередине скользящей поверхности вдоль лыжи. Желоб обеспечивает направление движения и отводит воду, образующуюся при таянии снега. В некоторых моделях лыж имеется по два желоба.

ПЭ независимо от его типа является неполярным и адгезионно неактивным материалом, обладающим в исходном состоянии низкой поверхностной энергией ($30-35$ эрг/см²) и ничтожно малой прочностью адгезионной связи с полярными адгезивами, в том числе термореактивными связующими, используемыми при получении армирующих препрегов для лыж. В тоже время, исходя из конструктивного исполнения лыж к ССЛ предъявляется комплекс технологических и функциональных требований. С одной стороны, как элемент слоевой конструкции, он должен быть надежно адгезионно соединен с сердечником, что предопределяет необходимость применения специальной механической и физико-химической активации его внутренней поверхности, контактирующей с препрегом. С другой стороны, внешняя (рабочая) поверхность слоя скольжения должна обеспечивать низкое трение в широком интервале изменения характеристик снежного наста, температуры, влажности снега. Названные во многом противоречивые функциональные требования к материалу ССЛ предопределяют необходимость использования ССЛ со слоевой структурой, так как обеспечить выполнение упомянутых требований за счет объемного модифицирования материала не представляется возможным.

В настоящем обзоре основное внимание уделено материаловедческим аспектам связи структуры и свойств материалов ССЛ, применяемых методов их модифицирования для управления основными показателями назначения: коэффициентом трения, поверхностной энергией, краевым углом смачивания (КУС), гидрофобными свойствами, стойкостью к абразивному изнашиванию и др. Проблемы, связанные с управлением адгезионной активностью внутренней поверхности ССЛ, контактирующей с препрегом, ввиду ограниченности публикаций в открытой печати, изложены лишь концептуально. Весьма кратко изложена также информация, отно-

сящаяся к проблемам нанесения смазок (мазей на рабочую поверхность ССЛ). Для обоснования основных требований, предъявляемые к материалу ССЛ, рассмотрим кратко специфику процессов трения, имеющих место при движении твердого тела по снегу.

Основные явления при трении твердого тела по снегу

Процессы трения по снегу и льду традиционно рассматривают в общем контексте, мотивируя это тем, что снег образован микрокристаллами льда, несмотря на то, что между льдом и снегом есть большие различия в плотности, твердости и абразивной способности, зависящие от морфологии снежинок, степени их уплотнения (возраста снежного наста), температуры и влажности снега, окружающего воздуха и т. п. Трение по снегу характеризуется низкими значениями коэффициента трения (0,02–0,1) в широком интервале температур, влажности снега, скоростей скольжения. Низким температурам и скольжению по свежеснеговому или искусственному снегу присуще повышенное трение, связанное с пропахиванием снега, разрушением и уплотнением снежинок. А старый, слежавшийся, «теплый» снег обеспечивает более низкое трение, что связывают со сглаживанием поверхности зерен льда (разрушением дендритной структуры снежинок) и одновременным ростом их размера и упругости [2].

Результаты исследований механизма трения, выполненных Bowden and Hughes [3], подтвержденные и развитые в работах других исследователей [4], объясняют низкое трение скольжения лыжи по снегу самосмазыванием тонкой пленкой воды, образующейся при плавлении кристаллов снега под влиянием фрикционного разогрева. Заметим, что по этой причине в англоязычной литературе для описания трения лыжи по снегу часто используется термин «трение глассирования» (*gliding friction*), подчеркивающий скольжение по разделительной пленке воды на уплотненной поверхности снега (льда), а не «трение скольжения» (*sliding friction*), применяемый для описания трения по твердой поверхности при наличии гораздо более тонких или несплошных слоев смазки либо при ее отсутствии. Однако, и в отсутствие внешних воздействий, на поверхности льда присутствует тонкий квазижидкий слой воды, существование которого было предположено еще Фарадеем в 1859 году для объяснения опытов по смерзанию ледяных шаров [5]. Наличие такого слоя было впоследствии подтверждено различными методами измерений, согласно результатам которых нижняя граница температурной области его существования достигает нескольких десятков градусов ниже T_{nl} льда в зависимости от метода детектирования, а толщина изменяется от нескольких молекулярных слоев до микронов по мере приближения к T_{nl} . Механизм образования квазижидкого поверхностного слоя (КЖС) льда по настоящее время остается предметом дискуссий [6]. Согласно [7] КЖС являет-

ся промежуточным состоянием льда с жидким состоянием системы водородных связей благодаря повышенной на много порядков концентрации как дефектов связей, так и ионных дефектов, что обеспечивает низкое трение при катании на коньках и лыжах, смерзание снега, течение ледников, адгезию льда.

Непосредственное подтверждение образования тонкой пленки воды при скольжении лыжи по снегу на равнине ($V = 20$ км/ч) и при скоростном спуске с гор ($V \leq 60$ км/ч), а не в модельных лабораторных условиях, предоставили Ambach and Maug [8], которые провели телеметрические измерения диэлектрической проницаемости в зазоре между лыжей и снегом при температурах воздуха и снега в интервале от -11 °C до 0 °C. Рассчитанные на их основе толщины пленок воды, образующихся при движении лыжника как по накатанной лыжне, так и по неуплотненному снегу, варьировались от 2–4 мкм до $\approx 13,5$ мкм. По другим данным, толщины пленок воды, в зависимости от внешних условий, колеблются от 50 нм [9] до 100–200 нм при T от -10 °C до -1 °C [10], увеличиваясь до нескольких микрометров по мере приближения к температуре плавления льда, что сопровождается ростом реальной площади фрикционного контакта от 10 до 100%.

Хотя самосмазывание тонкой пленкой воды считается основной причиной низкого трения лыжи по снегу, предлагаются и другие механизмы самосмазывания, например самосмазывание твердыми продуктами абразивного разрушения снежинок. Так, Lever с соавт. [11] опубликовали результаты измерений коэффициента трения и температур поверхности снега при трении в паре с образцом СВМПЭ на лабораторном трибометре в диапазоне скоростей скольжения 0,36–1,4 м/с, давлении 0,8–4,5 кПа, пути трения в несколько сот метров и температуре воздуха от -20 °C до -1 °C. Были зарегистрированы низкие значения коэффициента трения (от 0,02 до 0,09) несмотря на то, что фрикционный разогрев не превышал по абсолютной величине 1–4 °C, а температура поверхности снега в большинстве опытов оставалась к концу испытаний существенно ниже -10 °C и никогда не превышала -1 °C [12].

Частицы снега по данным сканирующей электронной, оптической и ИК микроскопической визуализации при этом разрушались по механизму абразивного изнашивания, а продукты разрушения сплавлялись и заполняли соседние поры, действуя как твердая смазка, что и обуславливало низкое трение. Заметим, что условия испытаний относятся к низкоскоростному трению, уступая на 1–2 порядка реальным скоростям лыжника при движении по равнинной и тем более горной местности при том, что значительный вклад сухого трения при низких температурах и низких скоростях скольжения не подвергают сомнению [13–16]. Коэффициент трения ПЭ по снегу в таких условиях достигает 0,15–0,18 (5 м/с, 5–10 Н [15, 16]).

Таким образом, механизм фрикционного взаимодействия в паре ССЛ–снег, в зависимости от

внешней температуры и скорости скольжения, нагрузки, шероховатости контактирующих поверхностей, имеет комплексный характер, заключающийся в возможности одновременной реализации различных режимов смазывания, начиная с сухого трения (особенно для носка лыжи при низких температурах, сухом снеге, низкой скорости скольжения), с постепенным переходом к трению в режиме самосмазывания пленкой воды по мере удаления от носка лыжи, роста скорости скольжения и приближения внешней температуры к точке плавления льда.

Изменение вклада различных факторов по мере увеличения толщины пленки воды показано на обобщенной кривой Штрибека (рис. 1 [14]). Представленная зависимость свидетельствует о том, что по мере роста внешней температуры генерируемого фрикционного тепла оказывается достаточно, чтобы обеспечить плавление кристаллов снега и переход от сухого трения к трению с обедненной смазкой (режим граничного трения), при котором сила трения определяется сопротивлением сдвигу микронеровностей поверхности контактирующих материалов. Дальнейшее повышение температуры трения и рост толщины разделительной пленки воды уменьшает вероятность контактирования микронеровностей, что соответствует переходу к трению в смешанном гранично-гидродинамическом режиме и далее в чисто гидродинамическом режиме смазывания, при которых достигаются минимальные значения коэффициента трения. Последующее увеличение толщины пленки воды сверх оптимальной увеличивает сопротивление скольжению в зоне II за счет роста сопротивления сдвигу слоев воды и вклада капиллярного сцепления между поверхностями. Минимальное трение (минимальное время спуска лыжника со склона) по данным [15, 16] достигается при температуре поверхности снега $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, а по мере дальнейшего роста температуры трение существенно возрастает из-за роста вязкостных потерь. Аналогичный характер изменения коэффициента трения СВМПЭ по льду от внешней температуры наблюдали и в лабораторных условиях при скорости скольжения 1,96 м/с [17].

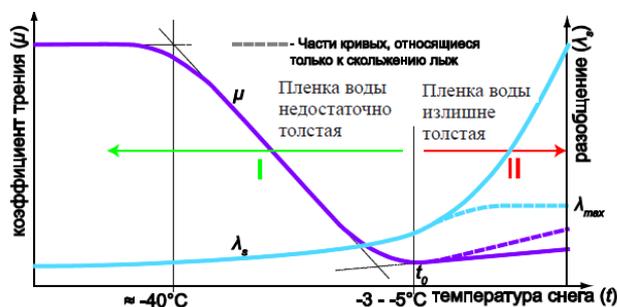


Рисунок 1 — Коэффициент трения и толщина разделительной пленки воды в зависимости от температуры (обобщенная кривая Штрибека). Пунктирные участки относятся к трению глассирования и отличаются от классической кривой Штрибека

Fig. 1 — The coefficient of friction and the thickness of the separation film of water as a function of temperature (generalized Stribeck curve). The dotted portions refer to the gliding friction and differ from the classical Stribeck curve

Таким образом, работа сил трения может быть представлена в виде суммы отдельных составляющих при допущении их взаимной независимости, а коэффициент трения μ лыжи по снегу является суммой следующих компонентов [2]:

$$\mu = \mu_{\text{пролах}} + \mu_{\text{сух}} + \mu_{\text{смаз}} + \mu_{\text{кан}} + \mu_{\text{эл}} + \mu_{\text{загр}} \quad (1)$$

Первых два компонента $\mu_{\text{пролах}} + \mu_{\text{сух}}$ в уравнении (1) отражают затраты сил трения на деформирование и разрушение частиц снега, а также на пропахивание и уплотнение снега при движении лыжи по неподготовленной лыжне и вносят большой вклад в условиях низких температур ($< -20\text{ }^{\circ}\text{C}$), низких скоростей скольжения, а для носка лыжи и при других внешних условиях трения. Поскольку при контакте твердых тел пластическому деформированию подвергаются микронеровности тела с более низкой твердостью и коэффициентом трения $\mu_{\text{сух}} = \tau / H$, где τ — прочность на срез, H — твердость [18], а сопротивление пропахиванию также пропорционально твердости, материал ССЛ должен превосходить по твердости кристаллы льда. Безусловно, он также должен обладать высокой абразивостойкостью и износостойкостью в условиях сухого трения.

Компоненты $\mu_{\text{смаз}} + \mu_{\text{кан}}$, связанные с трением в режиме обедненной смазки, преимущественно граничной и гидродинамической, отражают затраты на преодоление сопротивления сдвигу пленки воды между ССЛ и снегом ($\mu_{\text{смаз}}$) и капиллярного сцепления (подсасывания), создающего водные мостики связи между поверхностью ССЛ и снегом ($\mu_{\text{кан}}$). Оба компонента критически зависят от адгезии пленки воды или гидрофобности материала, которая определяется величиной свободной поверхностной энергии. Для гладкой поверхности она измеряется величиной равновесного краевого угла смачивания (КУС), который представляет собой угол, образуемый между касательной, проведенной к поверхности фазы жидкость–газ и твердой поверхностью с вершиной, располагающейся в точке контакта трёх фаз, и условно измеряемый всегда внутрь жидкой фазы. Обозначается греческой буквой тета (θ). КУС является количественной характеристикой процесса смачивания, его величина определяет межмолекулярное (атомное, ионное) взаимодействие частиц поверхности твердых тел с жидкостями.

Материалы с большими значениями КУС (θ) считаются при $\theta_0 \geq 90^{\circ}$ лиофобными по отношению к выбранной жидкости (гидрофобными в случае воды) и характеризуют низким уровнем поверхностной энергии. Их выбор является предпочтительным не только для условий «мокрого» трения в присутствии несплошной или «толстой» пленки воды, но и для условий сухого трения, поскольку величина поверхностной энергии (критического поверхностного натяжения) полимеров симпатна коэффициентам статического и динамического трения (табл. 1). Следовательно, такие полимеры могут обеспечить низкое трение ССЛ при одновременной реализации различных режимов смазывания, характерной для пары трения ССЛ–снег (лед) в широком интервале изменения внешних условий трения.

Таблица 1 — Коэффициенты трения (μ) по стали, критическое поверхностное натяжение (γ) и скорость абразивного изнашивания некоторых полимеров

Table 1 — Friction coefficients on steel (μ), critical surface tension (γ) and abrasive wear rates of some polymers

Полимер	γ , дин/см [19]	$\mu_{сталь}$, [19]	$\mu_{дун}$, [20]	Абразивный износ, мм ³ /м, (ГОСТ 11012)
Политетрафторэтилен (ПТФЭ)	18	0,04	0,10	6,0
Политрифторэтилен	20	0,30	–	–
Поливинилиденфторид (ПВДФ)	25	0,30	0,24	–
Поливинилфторид (ПВФ)	28	0,30	–	–
Полиэтилен высокой плотности (ПЭВП)	31	0,33	0,28	1,06
Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ, GUR 4012)	31	–	0,12	0,36
Полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)	31	–	0,60	0,7
Линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП)	–	–	0,55	0,22
Полипропилен (ПП) изотактический	30	–	0,26	–
Поливинил хлорид (ПВХ)	39	0,50	0,30	–
Поливинилиденхлорид (ПВДХ)	40	0,90	–	–

Как видно из табл. 1, низкими значениями поверхностной энергии и коэффициентов трения по металлу характеризуются полиолефины, полностью или частично фторированные: ПТФЭ, политрифторэтилен, ПВДФ, ПВФ, и полиэтилены — ПЭВП, СВМПЭ, ЛПЭНП. В отличие от ПТФЭ, полиэтилены, в первую очередь высокомолекулярные марки ПЭВП, ЛПЭНП и особенно СВМПЭ, обладают на порядок более высоким сопротивлением абразивному изнашиванию, что сделало их на сегодняшний день, с учетом высокой гидрофобности (КУС по разным данным от $\approx 88^\circ$ до $\approx 100^\circ$) и низкого коэффициента трения, практически безальтернативными материалами для изготовления ССЛ. Применительно к трению по снегу при T от -4°C до -2°C аналогичный вывод о корреляции КУС с коэффициентом трения сделали Giesbrecht с соавт. [21, 22], сопоставив КУС ряда полимеров и среднее время скатывания модельных лыж с гладкой ($R_a < 0,2$ мкм) поверхностью ССЛ с наклонной поверхности (рис. 2): в случае гидрофобных полимеров (ЛПЭНП и сополимеры ТФЭ с перфторалкиловым эфиром или этиленом), время скатывания существенно меньше, чем у гидрофильных (ПА66, ПЭТ, ПИ). Принципиально важным является также и то, что гидрофобные полимеры имеют гораздо меньшую адгезию ко льду по сравнению с гидрофильными [23], что должно оказывать свое влияние на намерзание льда при скольжении по влажному снегу.

Влияние химической природы полимера и компонентного состава на эксплуатационные характеристики ССЛ

Полиолефины. Наиболее широко для изготовления ССЛ применяется СВМПЭ различных марок с величиной молекулярной массы 5,0–10,5 млн. Да. Для ССЛ нижнего ценового сегмента применяют

экструзионные марки ПЭ высокой и средней плотности с молекулярной массой 0,4–0,6 млн. Да [24, 25], хотя отдельные изготовители заявляют об отказе от использования экструзионных марок ПЭ в производстве лыж [26].

В табл. 2, 3 приведены данные компаний «Creative Plastic Solutions» и «Isosport» о выпускаемых марках материалов ССЛ на основе ПЭВП и СВМПЭ. Подробно их рецептура не раскрывается, упоминается использование графита (3,5–10%) [25] и технического углерода (ТУ) (до 25 % [24]) без указания вида и марок, дисперсного ПТФЭ [24], кремнийорганики и солей металлов [27].

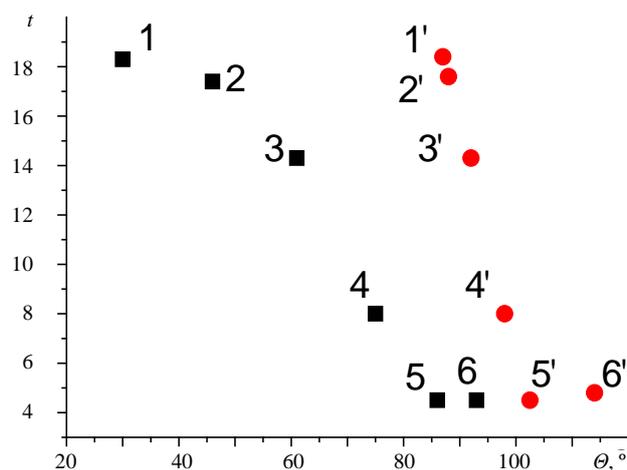


Рисунок 2 — Зависимость минимального безразмерного времени спуска t от величины динамического КУС оттекания (1–6) и натекания (1'–6') перпендикулярно направлению скольжения ССЛ. Обозначения: 1 – ПИ, 2 – ПЭТ, 3 – ПВДФ, 4 – сополимер ЭТФЭ, 5 – ЛПЭНП, 6 – сополимер ТФЭ с перфторвинилпропиловым эфиром (PFA, Ф-50)

Fig. 2 — Dependence of the minimum dimensionless descent time t on the value of the dynamic contact angle measured perpendicular to the sliding direction prior to gliding on snow. Designations: 1 – PI, 2 – PET, 3 – PVD, 4 – ETFE copolymer, 5 – LLDPE, 6 – PFA

Таблица 2 — Свойства композитов на основе СВМПЭ, применяемых для изготовления ССЛ
 Table 2 — Properties of UHMWPE composites used for fabrication of SB

		Изготовитель и торговое обозначение материала ССЛ										
		Creative Plastic Solutions					Isosport [25]					
Показатель, единица измерений	Стандарт	P-tex 2000	P-tex 2000 Electra ¹	P-tex 3000, черный	P-tex 4504, черный ¹	P-tex 5920, черный ¹	IS 7200	IS 7500	IS 7700	IS NHS Race 7510 C9x15x72	IS 7515	IS NHS Race 7825 C9x15x43
Плотность, г/см ³	DIN 53479	0,94	1,0	0,96	0,99	1,0	0,933	0,930	0,918	0,985	0,98	1,01
Молекулярный вес, 10 ⁶ Да	ISO/R1628, DIN 53728	5,0	5,0	9,2	9,2	10,5	5,0	9,0	6,0	5,0	9,2	10,5
Температура размягчения по Вика, °С	DIN ISO EN306	нд	нд	нд	нд	нд	130	133	129	130	130	132
Стойкость к абразивному изнашиванию	Суспензия песка (Сталь 37 = 100)	20	30	нд	нд	20	нд	нд	нд	нд	нд	нд
Содержание углерода, мас. %	PA FE009	–	нд	нд	нд	нд	–	–	–	10	15	25
Абсорбция воска, мг/см ²	Стандарт Австрии C9745 но при 110 °С* / PA FE C08**	1,9*	нд	нд	нд	1,9	1,75**	2,0**	2,2**	1,80**	1,90**	1,75**
Адгезионная прочность при отслаивании, Н/мм, не менее	CPS Norm 010	8	8	8	8	8	Вследствие различий в составе и условиях переработки, величина адгезии не нормируется, адгезия гарантируется только при использовании двухкомпонентного эпоксидного клея Araldite AW1136					

Примечание: 1 – Содержит добавки ТУ для повышения тепло- и электропроводности; 2 – содержит ТУ, и специальные добавки на основе фторсоединений и ПТФЭ; 3 – содержит ТУ и модификаторы на основе фторсоединений и парафинов для улучшения скольжения при низких температуре и влажности

Таблица 3 — Характеристики ССЛ из экструзионных марок ПЭ производства Isosport [25]
 Table 3 — Characteristics of the SB produced from extrusion grades of PE by Isosport company [25]

		IS TT 1600 000	IS 4800 000 durability	IS 6000 000 TD	IS 4800 999	IS 4800 996	IS 6000 993
Плотность, г/см ³	DIN 53479	0,925	0,935	0,935	0,943	0,961	0,945
Молекулярный вес, 10 ⁶ Да	Visk. ISO/R1628	0,3	0,4–0,6	сшитый	–	–	–
Стойкость к абразивному изнашиванию	Суспензия песка (Сталь 37 = 100)	–	–	–	–	–	–
Содержание углерода, мас. %	–	–	–	–	0,8	4	2
Абсорбция воска, мг/см ²	Стандарт Австрии C9745 но при 110 °С	2,80	2,20	1,65	1,30	1,40	1,75
Предел текучести при растяжении, МПа	DIN 43455	–	–	–	–	–	–
Относительное удлинение при растяжении, %	DIN 43455	–	–	–	–	–	–
Модуль упругости, МПа	DIN 53457	–	–	–	–	–	–
Адгезионная прочность при отслаивании, Н/мм	PA QW 001, H/40 мм	>30			>25		

Введение углеродных наполнителей и черных пигментов улучшает поглощение рассеянного снегом солнечного излучения, что способствует плавлению снега, самосмазыванию и снижению трения [28], хотя сами эффекты относительно малы по величине. Вместе с тем, введение наполнителей, например графита, ухудшает стойкость к абразивному изнашиванию [29]. Добавки ТУ улучшают антистатические свойства, но ухудшают гидрофобность ССЛ [30], что установлено при сравнении смачиваемости ненаполненного СВМПЭ марки *P-tex 2000* и *P-tex 2000 Electra*, содержащего электропроводящий углеродный наполнитель [31]. Из данных табл. 2 также видно, что при наполнении скорость абразивного изнашивания *P-tex 2000 Electra* возрастает в 1,5 раза, по сравнению с базовым СВМПЭ. Считается, что введение больших количеств графита в слой скольжения «теплых» лыж обосновано увеличением пористости скользящего слоя, что якобы препятствует подосу влаги. Однако, опубликованные результаты исследований по этому вопросу не встречаются. Создание определенной пористости ССЛ необходимо также для обеспечения требуемого уровня абсорбции воска, выступающего в роли модельной лыжной смазки, в соответствии с нормами стандарта Австрии С9745 (табл. 2, 3).

Еще одной причиной, обуславливающей необходимость введения графита и ТУ в состав ССЛ, а также в состав лыжных смазок, считают необходимость подавления трибоэлектризации, исследование которой в натуральных условиях представляет собой сложную экспериментальную задачу. Кроме того, считается, что вследствие высокой теплопроводности графит не позволяет лыже перегреваться. Полученные Colbeck [32] оценки степени электризации ССЛ лишь подтверждают ее наличие при высокой (свыше 20 км/ч) скорости скольжения по свежему сухому снегу и воспроизводимое увеличение до 1–2 В за 30–40 с скоростного спуска со скоростью 30–40 км/ч, тогда как в случае мокрого снега или накатанной лыжни электризация существенно ослаблена. Вопреки ожиданиям, зарегистрировано увеличение, а не снижение электризации при использовании лыжных смазок с добавками графита и антистатиков и не найдено прямых подтверждений значимого влияния электризации на скольжение лыж (хотя автор упоминает об электрических разрядах, наблюдаемых лыжниками при катании в ночное время). Тем не менее, в работе [32] высказано предположение о возможности достижения потенциала в несколько киловольт при высокоскоростном скольжении по сухому снегу при низких температурах. Как показали Arakawa и сотр. [33], такой потенциал способен повысить трение в паре лед–сталь в несколько раз в случае постоянного и более чем на порядок в случае переменного тока (60 Гц), хотя последнее представляется нереалистичным для пары трения ССЛ–снег. Кроме того, в реальных условиях электризация ССЛ будет ограничена стеканием заряда через пленку воды, поэтому вклад компонента $\mu_{эл}$, обусловленного сопротивлением скольжению

силами электростатического взаимодействия, будет сильно зависеть от внешних условий. Столь же непостоянна и величина $\mu_{загр}$, связанная с накоплением загрязнений в поверхностном слое трения под влиянием только электризации, без учета вклада от механического внедрения инородных частиц в слой смазки.

Приведенные выше литературные данные о влиянии углеродных наполнителей на гидрофильность, абразивостойкость и коэффициент трения ПЭ свидетельствуют о разнонаправленном характере изменения наиболее важных эксплуатационных характеристик полимера ССЛ при наполнении. Это обстоятельство, равно как и сложность выполнения строгих сравнительных натуральных испытаний, не позволяют сделать однозначный вывод о преимуществе наполненных графитом и ТУ (табл. 2, 3) марок СВМПЭ перед базовыми, хотя они и составляют значительную часть ассортимента компаний, специализирующихся на выпуске материалов для изготовления ССЛ. В пользу этого косвенно свидетельствует использование многими производителями лыж окрашенных марок СВМПЭ общетехнического назначения, выпускаемых компанией «Okulen» (Германия).

В завершение данного раздела необходимо отметить, что технологические режимы производства лыж также оказывают свое влияние на свойства поверхности ПЭ ССЛ. Анализ морфологии ПЭ, подвергаемого в процессе производства лыж экструзии или спеканию, пламенной активации поверхности и компрессионному прессованию, методами КР-спектроскопии и ДСК показал [34], что, в отличие от экструзионного ПЭВП, СВМПЭ претерпевает в процессе переработки и изготовления лыжи заметное снижение степени кристалличности, что может оказать отрицательное влияние на устойчивость к окислению, следовательно, на его гидрофобность и долговечность. Эти результаты, по-видимому, легли в основу рекомендаций по минимизации воздействия повышенных температур и давления на ССЛ из СВМПЭ при производстве лыж *Speedmax* компании «Fischer» [26]. Согласно им, сборка лыжи осуществляется в два этапа. На первом этапе лыжа без ССЛ склеивается в прессе при прежних повышенных температурах и давлении. На втором этапе ССЛ приклеивается к основе с использованием клея холодного отверждения.

Дальнейшие исследования показали [27], что наибольшие изменения в морфологии ПЭ ССЛ происходят на заключительном этапе изготовления при нанесении микроструктуры с помощью абразивного инструмента (так называемый штайншлифт или насечка). Степень кристалличности тонкого наружного СВМПЭ по данным КР-спектроскопии при этом снижается на 14–19%, что, по-видимому, обусловлено его быстрым фрикционным разогревом до температур выше температур плавления СВМПЭ и последующей рекристаллизацией, что практически не проявляется при оценке кристалличности методом ДСК, достоверно анализирующим достаточно толстые слои материала. Эти результаты подтвер-

ждают обнаруженный ранее Кузьминым с соавт. [35] эффект снижения КУС ССЛ на основе композита СВМПЭ-графит после штайншлифта, по сравнению с циклеванной поверхностью, обусловленный разогревом поверхности при ее абразивной обработке, и подчеркивают исключительную чувствительность поверхностной энергии к изменениям структуры тончайшего мономолекулярного поверхностного слоя.

Фторированные полимеры и модификаторы.

Фторполимеры, и прежде всего ПТФЭ, остаются в фокусе внимания исследователей при разработке новых материалов для ССЛ с улучшенными характеристиками. Стамбулидис с соавт. [17] исследовали влияние шероховатости поверхности полимера и ее гидрофобности на коэффициент трения трех полимеров, СВМПЭ, ПММА и ПТФЭ в интервале скоростей скольжения 0,1–2 м/с, при температурах от $-7,5$ °С до $-1,5$ °С и интервале R_a 0,76–1,4 мкм. Найдено, что коэффициент трения по льду находится в обратно пропорциональной зависимости от величины КУС поверхности водой: чем более гидрофобна поверхность полимера, тем ниже коэффициент трения, независимо от величины R_a в заданном узком диапазоне ее изменения. При переходе от режима трения с обедненной смазкой к граничному трению падение коэффициента трения также более выражено при повышенной гидрофобности полимера, что подтверждает превосходство ПТФЭ для применения в ССЛ.

Эти достоинства ПТФЭ явились основанием для проведения сравнительных испытаний лыж с ССЛ на основе Тефлона (торговое название ПТФЭ компании «DuPont Company»), малонаполненного композита PTFE CSC 1,2, содержащего 1,2% проводящего наполнителя и СВМПЭ [36, 37], показавших увеличение выката лыж со ССЛ на основе Тефлона на 25–27%, по сравнению с СВМПЭ при спуске с холма лыжи с грузом. Однако, при спуске лыж с лыжником прирост выката снизился до 4,6% [37]. Данные об испытаниях по другим характеристикам ССЛ из ПТФЭ и его композитов, по имеющимся сведениям, не публиковались.

Надо отметить, что ненаполненный ПТФЭ отличается крайне низкой износостойкостью при трении без смазки по гладким поверхностям, что в свое время потребовало выполнения исследований по повышению его износостойкости и привело к созданию антифрикционных композитов на его основе, превосходящих по износостойкости базовый полимер на 2–3 порядка. Промышленностью выпускаются композиты ПТФЭ, наполненные дисперсными графитом, коксом, дисульфидом молибдена, углеродными и стеклянными волокнами [38]. Для особо нагруженных узлов трения выпускаются ленточные материалы, представляющие собой стальную ленту с припеченной к ней через слой порошка бронзы бронзово-латунной сетки, импрегнированной смесью дисперсных ПТФЭ и свинца. Опыт применения такого ленточного материала в качестве покрытия полозьев саней при движении саней по зимнику в условиях низких температур, наличия участков до-

роги с неравномерным снежным покровом, участками наледи и небольшим количеством щебня и песка показал [39], что он значительно уступает по износостойкости и долговечности покрытиям из СВМПЭ, что, по-видимому, обусловлено значительным вкладом абразивного изнашивания в заданных условиях натуральных испытаний и негативным влиянием наполнения на абразивостойкость ПТФЭ. С учетом этого, значительный интерес могут представлять плавкие сополимеры ТФЭ с этиленом и перфторвинилпропиловым эфиром с низкими значениями поверхностной энергии (марки Ф-50, Ф-40), которые превосходят ПТФЭ по стойкости к изнашиванию и прочностным характеристикам.

Прямая связь между гидрофобностью и трением скольжением полимеров по снегу побуждает проведение исследований, направленных на повышение гидрофобности ПЭ для ССЛ. Так, некоторыми компаниями ПТФЭ уже используется как целевая антифрикционная и гидрофобизирующая добавка в СВМПЭ [25]. Изучаются возможности гидрофобизации ПЭ введением перфторированных модификаторов при компаундировании [40, 41], прямым фторированием поверхностного слоя ПЭ с помощью плазмохимической обработки в среде фторсоединений [41], введением перфторированных модификаторов в состав мазей и т. п. [42].

Как известно [43], для снижения коэффициента трения и скорости изнашивания пар сухого трения широко применяют перфторполиэфиры (ПФПЭ). Разветвленного строения: *Z-dol 4000*, *Fomblin® Y06* («Ausimont INC»), *Fluoroguard* –OCF₂–CF(CF₃)– («DuPont Company»). Неразветвленного строения: *Fluorolink* («Solvay Solexis»), содержащий звенья –OCF₂–CF₂– и –OCF₂, поверхностное натяжение которых 10–20 мН/м существенно ниже, чем у ПТФЭ. Оценка возможности их использования для гидрофобизации ПЭВП показала, что введение 2% ПФПЭ *Fomblin® Y06* обеспечивает увеличение КУС ПЭВП от $\approx 100^\circ$ до 110° [40]. ПФПЭ вводится в расплав по стандартной экструзионной технологии, при этом КУС не растет при увеличении количества ПФПЭ сверх 2 мас.%, что, видимо, является следствием достижения предела растворимости ПФПЭ в ПЭВП. Достигнутое значение КУС практически не изменяется после 1–4 месяцев хранения образцов. Согласно сделанным оценкам на основании данных ИК-спектроскопии и вторичной ионной масс-спектрометрии, ПФПЭ создает на поверхности ПЭВП пленку толщиной в единицы нанометров, которая может эффективно влиять на трибологические свойства его поверхности. Так, Sinha и соавт. [44] показали, что пленки ПФПЭ *Z-dol 4000* толщиной 4–5 нм, нанесенные на блочный СВМПЭ из 0,2% раствора в гидрофторполиэфире *H Galden ZV* («Ausimont INC»), обладают высокой долговечностью, обеспечивающей 2–5-кратный рост ресурса пары трения СВМПЭ–алюминий. В случае объемного модифицирования СВМПЭ можно ожидать, что влияние ПФПЭ на свойства поверхности и три-

биологические характеристики также не будет зависеть от времени.

Применительно к трению СВМПЭ по льду Stamboulides с соавт. [41] исследовали как влияние фторорганических добавок, так и прямого фторирования на гидрофобность поверхности СВМПЭ и коэффициент трения скольжения. Оказалось, что введение жидкого перфторированного полиалкилэфира (ПФПАЭ) марки *Krytox* («DuPont», США) в количестве до 7,5 мас.% приводит к монотонному увеличению КУС поверхности СВМПЭ (*GUR 4170*) с 88 ± 6 до $112 \pm 4^\circ$, однако коэффициент трения СВМПЭ в зависимости от температуры испытаний (-7°C , -4°C , $-1,5^\circ\text{C}$), скорости скольжения (0,079 м/с; 0,79 м/с и 1,98 м/с) и содержания модификатора меняется немонотонно. В большинстве экспериментов отмечено некоторое снижение μ при содержании 1–2,5 мас.% ПФПАЭ и температурах выше -7°C . При фиксированном содержании ПФПАЭ (2,5%) коэффициент трения СВМПЭ в зависимости от температуры испытаний в большинстве случаев повышается, особенно при низких температурах трения от -30°C до -5°C , хотя в ряде случаев отмечено и небольшое его снижение, по сравнению с исходным СВМПЭ, при температурах ближе к плавлению льда (в пределах нескольких процентов), что, предположительно, обусловлено улучшенной гидрофобностью и подавлением капиллярного эффекта торможения. Обработка СВМПЭ плазмой в атмосфере CF_4 более резко усиливала гидрофобность поверхности и повышала КУС с 82° до 138° , однако коэффициент трения при этом снижался только при высокой скорости скольжения (1,96 м/с). При оценке изменений КУС следует учитывать то, что плазмохимическая обработка СВМПЭ сопровождается как фторированием, так и травлением поверхности с удалением преимущественно аморфной фазы полимера. Это приводит к увеличению шероховатости R_a от 0,76 мкм до 1,56 мкм и оказывает самостоятельное влияние на смачивание.

Немонотонный характер изменения КУС и пенетрации смесей парафинового воска с фторорганическим модификатором также наблюдали при отработке рецептур лыжных мазей, в ходе которых был выявлен рост обоих показателей при увеличении содержания модификатора от 0% до 4%, их снижение в интервале от 5% до 10% и последующая стабилизация при 10–50% содержании модификатора [42]. Первоначальный рост гидрофобности объясняют преимущественной локализацией на поверхности смесей фторуглеродных фрагментов молекул модификатора, содержащих как фторуглеродный, так и углеводородный участки, что облегчает пенетрацию благодаря их смазочным свойствам. Последующее снижение гидрофобности и пенетрации связывают с агрегацией молекул модификатора и локализацией фторуглеродных участков в объеме мицелл, что согласуется с небольшим снижением содержания фтора на поверхности смесей по данным рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Эти дан-

ные обосновывают целесообразность использования небольших концентраций фторсодержащих модификаторов как при создании смазок, так и при модифицировании полимерной основы ССЛ. Отсутствие прямой корреляции между концентрацией фтора в поверхностном слое смазки с КУС и поверхностной энергией отмечают также в работах [45, 46].

Наряду с фторорганическими, известными модификаторами трения полиолефинов являются ПАВ углеводородной природы, в том числе жирные кислоты и их амиды [47]. Эффективность использования амидов, жирных кислот может быть усилена, если их вводить в виде продукта совместной термической обработки с органоглиной *Cloisite 20A*, которая при самостоятельном введении не снижает коэффициента трения ЛПЭНП [48], тогда как продукт совместной термической обработки органоглины с эрукамидом (ЭА) позволяет уменьшить коэффициент трения в ≈ 2 раза, по сравнению с составом, содержащим только эрукамид (0,25%), при одновременном уменьшении содержания ЭА в полимере в 2–4 раза.

Управление гидрофобностью ССЛ с помощью регулируемой микро топографии поверхности

Следует отметить, что подход к гидрофобизации с использованием единственно химических методов модифицирования поверхности имеет свои ограничения, поскольку минимальное значение равновесного КУС среди известных химических соединений с минимальным значением поверхностной энергии (фторпарафин перфторэйкозан, $\gamma = 6,7 \text{ мДж/м}^2$) составляет только 122° [49], что лишь незначительно превосходит соответствующий показатель для ПТФЭ (110°). Между тем в природе известны поверхности с КУС свыше 150° , супергидрофобные свойства которых достигаются за счет сочетания регулярной микро- и нанотопографии поверхности с гидрофобными свойствами тонких слоев биопарафинов (эффект лотоса). По этому же пути — сочетанию методов управления микро(нано)топографией поверхности с методами физико-химического модифицирования материалов, ведутся разработки технологии супергидрофобных материалов, изделия из которых обладают полезными потребительскими свойствами, например, эффектом самоочистки поверхности, улучшенными электроизоляционными показателями в условиях повышенной влажности, уникальными фильтрующими свойствами и др. Создание оптимальной топографии поверхности осуществляется разными способами — плазмохимическим или химическим травлением; осаждением наночастиц электрическим, электрохимическим или из газовой фазы; темплатного формования с последующим удалением темплата [49].

Успешный пример темплатной обработки поверхности СВМПЭ приведен в работе [50], в которой для повышения гидрофобности поверхности ее подвергали тиснению металлической сеткой при повышенной температуре с целью создания микроячеистого рельефа. При уменьшении ячейки сетки и

размера формируемых микровыступов с 78 мкм до ≈ 51 мкм КУС увеличился с 78° до 112° , т. е. до уровня КУС ПТФЭ. Упомянутый выше штайншлифт также способен существенно повысить гидрофобность ПЭ, несмотря на конкурирующее негативное влияние сопровождающей его деструкции. Согласно Кузьмину [35], аналогичный по величине эффект гидрофобизации может быть достигнут при использовании оптимальной текстуры абразивного камня, при которой динамический КУС (натекания) графитонаполненного СВМПЭ увеличивается от $104,67^\circ$ до $112,15^\circ$ (рис. 3).

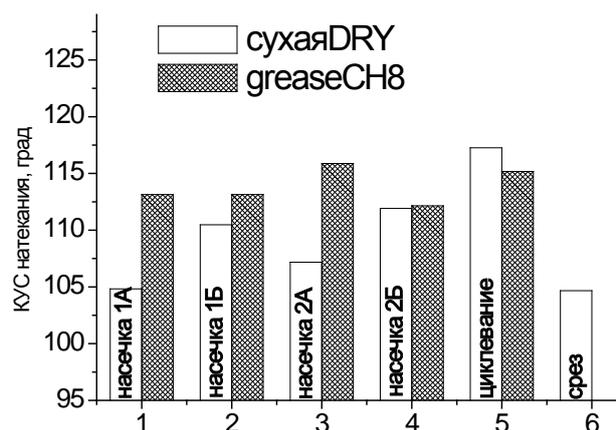


Рис. 3 — КУС натекания сухих поверхностей композита СВМПЭ/графит после насечки (1–4) циклевания (5) или среза (6), и последующего нанесения парафиновой смазки CH8 [35].

Fig. 3 — Advancing contact angles of UHMWPE/graphite bases after different patterns of stone grinding (1–4), HSS scraping (5) or a cut (6), dry and lubricated with CH8 grease [35].

Нефедовым [51] для создания выигрышной микротопографии гидрофобных покрытий на основе фторсополимерных пленкообразователей опробовано введение небольших количеств нанонаполнителя (2–3 мас.% азросила), что позволило незначительно, в пределах 3° , повысить КУС покрытий на их основе. Заметно больший по величине эффект был достигнут в этой работе при химическом модифицировании связующего низкомолекулярными фторпарафинами (ППУ-90, ППУ-110, ППУ-180), содержащими значительное количество трифторметильных групп, в результате чего КУС превысил 120° [51, 52]. Подобный комбинированный подход реализован и в исследовании Ruukilainen et al. [53], в котором ПЭНД и его сополимер с бутеном модифицировали перфторполиэфиром (ПФПЭ *Fomblin® Y06*), а регулируемую микротопографию поверхности создавали с помощью двух масок из анодированного алюминия, задающих расстояние между выступами 100–120 нм и 130–190 нм. Установлено, что химическое модифицирование ПЭ повышает КУС на 8 – 10° (до $\approx 100^\circ$), а применение масок позволяет увеличить его затем до 132 – 138° .

В завершение необходимо остановиться на маркетинговой информации, в отсутствие публикаций в научно-технической литературе, об использовании тефлона или других фторполимеров для импрегнирования ССЛ, как составной части технологии изготовления лыж, не требующих при-

менения смазки. Технология предложена компанией «Atomic» в 2011 году под названием *Skintec technology*, и с тех пор активно развивается ею и другими участниками рынка. Ее отличительной чертой является сочетание особой текстуры ССЛ, названной синтетическим мохером, обеспечивающей, подобно меху, камусу [54] или текстуре типа «рыбья чешуя», хорошее скольжение при движении вперед и препятствующей движению назад, что улучшает сцепление ССЛ под колодкой при толчке или подъеме в гору. Кроме того, ССЛ «импрегнирован тефлоном», а участок ССЛ под колодкой выполнен в виде легко заменяемых съемных модулей с различной насечкой [55], позволяющих быстро адаптировать лыжи к изменениям состояния снега. Технология Optigrip 2.1 компании «Yoko» также сочетает подобную текстуру ССЛ, минимизирующую отдачу, с использованием «(нано)материала с высоким содержанием фтора» в зоне носка и пятки ССЛ и мягким эластомерным материалом под грузовой площадкой (колодкой) и с заводской обработкой лентой скольжения *Optiwax* (обеспечивает до 100 км пробега без смазки) [56]. Следует отметить, что маркетинговая информация не может быть строгим техническим описанием использованных материаловедческих и технологических решений, и применяемая терминология обязана быть «расплывчатой». Тем не менее, очевидно, что лидеры рынка стремятся добиться повышения показателей назначения современных моделей пластиковых лыж за счет использования управляемой микротопологии и текстурирования поверхности ССЛ, повышения антифрикционных характеристик, гидрофобности и износостойкости полимерных материалов с применением фторированных полимеров и модификаторов, что позволяет выводить на рынок в том числе модели лыж, не требующих смазки.

Кузьминым [35, 58] выдвинута гипотеза о том, что перед гонкой необходимо отциклевать скользящую поверхность (с целью обнажения свежего слоя пластика), обработать щетками и фибртексом, не применяя парафинов. Это утверждение вызвало широкое обсуждение среди специалистов и любителей лыжных гонок.

Смазывание ССЛ

Несмотря на существующую тенденцию создания материалов для ССЛ, не требующих смазки (специальных масел), проблема оптимизации технологии и состава смазок все же весьма актуальна [57–64]. Смазка, наносимая на рабочую поверхность ССЛ, определяет трение скольжения и силу сцепления лыж при взаимодействии со снегом. На основании сравнительных экспериментов и отзывов спортсменов-гонщиков установлено [61], что использование смазок и прогрессивных технологий смазывания лыж дает лучшие результаты, особенно при изменяемых погодных условиях, по сравнению со

специально обработанной поверхностью ССЛ, но без использования масел. В связи с этим рассмотрим кратко общую информацию о специфике смазывания ССЛ.

Современные лыжные мази обеспечивают хорошее сцепление со снегом, устраняют подмерзание лыж, придают лыжам лучшее скольжение, имеют широкие температурные диапазоны применения, не накапливают грязь, ухудшающую скольжение, хорошо удерживаются на скользящей поверхности, при их производстве обеспечивается надежный контроль качества. Выпуск масел для гонок высшего уровня требует сложных исследований и дорогостоящих процессов при производстве. Производство масел становится все более наукоемким и трудоемким, но в результате процесс смазывания лыж постоянно упрощается.

Подготовка коньковых и классических лыж отличается только тем, что лыжи, предназначенные для классического стиля, имеют специальную зону под колодкой, на которую наносится мазь. ССЛ подвергается, как правило, следующим стадиям обработки [57]: циклевание, подготовка для грунтовки, грунтовка (до нанесения основного слоя смазки в соответствии с погодными условиями), грунтовка лыж под основной слой смазки, нанесение основного слоя, нанесение порошка ускорителя.

Существует два способа обновления (циклевания) скользящей поверхности лыж: заводской (штайншлифт) и ручной. Циклевать скользящую поверхность необходимо металлической циклей до тех пор, пока не будут убраны все ее дефекты (неровности, раковины, следы от царапин и т. п.). После циклевки ССЛ тщательно вычищается латунной или бронзовой щеткой и жестким фибертексом, а затем обрабатывается грунтовочным парафином. При этом желательнее применять парафин в избыточном количестве, прогревая лыжи два, три раза без промежуточного циклевания и добавляя парафин постольку, поскольку он сорбируется (впитывается) поверхностью ССЛ. Выбор состава грунта и технологии его нанесения на ССЛ является весьма важным моментом, поскольку грунт обеспечивает сцепление последующих слоев наносимой мази со слоем скольжения, удержание на нем этих слоев и улучшает стойкость к истиранию смазки. Для обеспечения хорошего впитывания материалы грунта и ССЛ должны быть взаимно растворимы (обладать термодинамическим сродством, совместимостью). Предсказать совместимость можно на основании предварительного расчета и сопоставления величин параметров растворимости Гильдебранда (δ) смешиваемых веществ, определяемых из соотношения:

$$\delta = \sqrt{\frac{\Delta E_0}{V}}, \quad (2)$$

где $\Delta E_0 = \Delta H_0 - RT$; ΔH_0 — скрытая теплота испарения вещества; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; V — мольный объем материала. Квадрат параметра растворимости представляет собой плотность энергии когезии, т. е.

величину энергии когезии, деленную на мольный объем:

$$\delta^2 = \Delta E_0 / V. \quad (3)$$

Согласно [64]

$$\delta^2 = \frac{\Delta E^*}{N_A \sum_i \Delta V_i}, \quad (4)$$

где $\Delta E^* = k \cdot \Delta E$ — энергия когезии, уменьшенная во столько раз, во сколько ван-дер-ваальсов объем молекулы меньше мольного объема; N_A — число Авогадро.

Величину ΔE^* следует рассматривать как аддитивную [65]:

$$\Delta E^* = \sum_i \Delta E_i^*, \quad (5)$$

где ΔE_i^* — вклад каждого атома и типа межмолекулярного взаимодействия в ΔE^* .

Тогда

$$\delta^2 = \frac{\sum_i \Delta E_i^*}{N_A \sum_i \Delta V_i}, \quad (6)$$

где ΔE_i^* и ΔV_i — табличные величины [66]. В связи с этим, для предсказания значений параметра растворимости расчетным путем достаточно знать его молекулярную структуру. При отсутствии сильных специфических взаимодействий между молекулами совмещаемых материалов, что типично для материалов ССЛ и грунтовочного парафинового слоя, термодинамическая совместимость между ними должна наблюдаться при различии в значениях параметров растворимости не более 2 (Дж·см⁻³)^{0,5} [67]. Используя расчетный подход, можно предварительно прогнозировать изменение совместимости материалов ССЛ и грунта, а значит и впитываемости (сцепление с основой) последнего, и целенаправленно осуществлять его выбор. Значение δ для ПЭ составляет 16,15 (Дж·см⁻³)^{0,5} [66], парафиновые смазки имеют близкие к этому значения данного параметра и хорошо совместимы с материалом ССЛ. Однако при химическом модифицировании парафинов или смешении их с целевыми добавками, например фторпарафинами (фторуглеродами), величина δ материала грунта может заметно отличаться от таковой для ПЭ, например для фторпарафинов C₄₋₈, в которых атомы водорода полностью заменены фтором (перфторуглеродов) значение δ составляет 11,25–11,86 (Дж·см⁻³)^{0,5} [66, 68]. Таким образом разность δ ПЭ и фторпарафиновой смазки составляет 4,29–4,90 (Дж·см⁻³)^{0,5}, то есть более чем в два раза выше значения, при котором должна обеспечиваться совместимость, что, безусловно, негативно скажется на с впитывании грунта в поверхностные слои ССЛ. При смешении фторуглеродов с парафинами и другими модификаторами значения δ получаемой смазки может изменяться в достаточно широких пределах в зависимо-

сти от химической структуры смешиваемых компонентов. Усредненное значение δ смеси могут быть легко рассчитано на основании известных соотношений компонентов в смазке и их химической структуры [65, 66].

При грунтовке ССЛ под соответствующую погоду рекомендуется учитывать, что температура плавления используемого парафина должна быть выше температуры плавления основной смазки, то есть грунтовочный парафин должен быть более тугоплавким (в этом случае основная смазка не смешивается с грунтовочным слоем). В случае холодной погоды, когда в качестве основного используется морозный (тугоплавкий) парафин, и нет возможности в качестве грунтовочного использовать более твердый, грунтовка осуществляется парафином, аналогичным по твердости основному [57]. При очень старом, жестком, «агрессивном» снеге, если длительный период времени стоит одна и та же погода (особенно мороз), то для снятия с поверхности электростатического напряжения при грунтовке рекомендуется использовать парафин-«антистатик» (например «*START*»-*antistatic* или «*REX*»-*antistatic*). При грунтовке лыж под соответствующую погоду под обычный парафин рекомендуется использовать простой, а под фторсодержащий — фтористый парафиновый слой. Грунтовка производится при помощи утюга, нагретого до температуры плавления парафина (как правило это 120 °С).

Для достижения наилучшего скольжения очень важно подобрать парафин, соответствующий конкретным погодным условиям, для чего оцениваются: структура, влажность, температура и загрязненность снега; влажность и температура воздуха. Например, твердые и острые снежинки нуждаются в твердом и устойчивом к истиранию парафине. Для мокрого и грязного снега требуется смазка, обладающая хорошими водоотталкивающими свойствами, лучше фторированная. Для тестирования смазок рекомендуется использовать специальный прибор «Уктус» (ФГУП НПО автоматики, Екатеринбург), который по скорости вращения на снегу специальных пластиковых дисков с нанесенными на них парафинами определяет скользящие характеристики тестируемого парафина.

При нанесении основного слоя смазки под соответствующую погоду наиболее подходящий парафин отбирается путем тестирования. Для этой цели используют несколько четырехгранных пластиковых брусков, у которых каждая грань моделирует небольшую лыжу, грани нумеруются, и после тестирования обеспечивается получение информации о том, какая мазь скользит наилучшим образом в конкретных погодных условиях. После тестирования на ССЛ наплавливают с помощью утюга выбранный парафин. Дают остыть и циклюют при помощи пластмассовой цикли. Далее нейлоновой щеткой удаляют остатки парафина. Затем производится шлифовка до блеска при помощи либо шлифовальной ткани, либо при помощи более мягкой

щетки. Нанесение последнего слоя (сыпучего порошка или спрессованного ускорителя) осуществляют следующим образом. Порошок посыпают тонким слоем на ССЛ, а затем при помощи утюга оплавливают. После остывания скользящую поверхность лыжи очищают от излишков порошка при помощи натуральной щетки из конского волоса и шлифуют полировальной бумагой.

Спрессованный (твердый) порошок наносится последним, очень тонким слоем на скользящую поверхность. Способ обработки может быть как горячим, так и холодным. Горячий способ предполагает использование утюга, но между подошвой утюга и поверхностью лыжи желательно иметь прослойку из нетканого материала, то есть производить прогрев через этот нетканый материал (например, используют полировальную бумагу). Все ускорители, как твердые, так и сыпучие, содержат фтористые соединения, прослойка между утюгом и самим ускорителем предупреждает улетучивание фтора. Порошки и ускорители можно растереть и в холодном виде. Для этого порошок посыпают на скользящую поверхность лыжи (а ускорителем лыжу натирают) и растирают рукой, натуральной или специальной полировальной пробкой. Затем обрабатывают натуральной щеткой и шлифуют полировальной бумагой. Однако нанесенный таким образом порошок удерживается на лыже хуже, чем порошок, закрепленный на лыжах с помощью горячего утюга, и данный способ приготовления лыж рекомендуется лишь при участии в соревнованиях на короткие (5–15 км) дистанции.

После нанесения на концы лыж порошка следует обязательно удалить пыль, которая неизбежно попадает на колодку при подготовке концов лыж. Для этого металлической циклей колодка очищается от остатков порошка и парафина, иначе мазь с нее будет сходить очень быстро. Затем водостойкой шкуркой убирается ворс под колодкой, если в этом есть необходимость (например, при подготовке лыж на жесткий кристаллический снег, фирн, лед), укладывается грунтовочная мазь и затем мазь на держание.

Сказанное свидетельствует о сложности технологии смазывания ССЛ, зависящей от состава используемых масел и техники смазывания, реализуемой конкретными сервисменами. Много зависит от выбора конструкции лыж, масел скольжения и держания, структуры скользящей поверхности, определения оптимального количества рабочих циклов наплавления-снятия парафина.

Важнейшие виды базовых компонентов современных смазок — углеводороды трех типов, смешивая которые получают системы с разными функциональными свойствами [61]:

- парафины с линейной структурой и числом атомов углерода в основной цепи C_{20-35} . Такие смазки имеют низкий коэффициент трения, но недостаточно прочны и разрушаются под давлением;

- разветвленные углеводороды с C_{25-50} . Обладают повышенным μ , по сравнению с парафинами, но более пластичны, упруги и лучше работают под давлением;

– синтетические слегка разветвленные смазки с $C_{>50}$. Твердые и хрупкие, использующиеся в качестве отвердителей, загустителей, парафиновых смазок.

Кроме углеводородов в состав лыжных смазок могут входить разнообразные добавки, улучшающие их свойства. Одна из них — фторуглероды (ФУ), в которых хотя бы часть атомов водорода заменена на атомы фтора. ФУ отталкивают воду, находящуюся в жидком состоянии, и поэтому хорошо работают на мокром «теплом» снегу или на «холодном» снегу при большой влажности. Фторуглеродные смазки обычно состоят из смеси фторуглеродов с углеводородами с содержанием ФУ до 16% [60]. Эти смазки имеют меньший μ и лучше отталкивают воду по сравнению с парафинами. Весьма перспективно применение для смазывания мазей-фторпарафинов, имеющих дифильную молекулярную структуру, включающую парафиновые и фторуглеродные фрагменты. Парафиновый фрагмент подобной смазки обеспечивает совместимость (сцепление) со ССЛ, а фторуглеродный улучшает триботехнические характеристики при трении по снегу.

Имеющееся разнообразие базовых и модифицирующих компонентов позволяет создавать широкий ассортимент смазок для лыж, выпускаемых рядом компаний. Ведущими среди которых являются «Swix» (Норвегия) и «Тoko» (Швейцария), где выпускается большой ассортимент парафинов, мазей, порошков для использования при температуре от $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. В 2010 году эти два ведущих производителя лыжных мазей в мире образовали единую компанию «Тoko Swix Sport AG», при этом обе торговые марки продолжили существование, разделяя рынок по направлениям. Разработки в области смазок для ССЛ ведутся постоянно из-за дороговизны и отрицательного влияния ФУ на экологию. Рекомендуют не применять смазки из ФУ для смазывания любительских лыж или лыж, используемых в соревнованиях местного масштаба [61].

Адгезионное соединение ССЛ с препрегом

ССЛ из ПЭ, вследствие своей неполярности и малой поверхностной энергии (30–35 мН/м [69]), обладает низкой адгезионной активностью по отношению к полярным субстратам, таким как препрег для лыж (расчетное значение поверхностной энергии эпоксидного связующего для стеклопластикового препрега составляет 500 мН/м [70]). Поэтому, как уже упоминалось, требуется специальная подготовка поверхности ССЛ, адгезионно соединяемой с препрегом, для интенсификации межфазной адгезии. В открытой печати информация о подготовке поверхности ССЛ к склеиванию с препрегом и технологии склеивания, равно как и в составах применяемых препрегов, крайне ограничена. Можно лишь утверждать, что каждая из фирм-производителей лыж использует наиболее приемлемый по технико-экономическим соображениям метод применительно к собственному производству.

Исходя из общих рекомендаций [69], а также современных технологий получения ССЛ и формирования лыжи в целом [1, 26] в данном разделе мы ограничимся лишь общими рекомендациями по перспективам решения проблемы адгезионного соединения ССЛ с препрегом. Во-первых, перед склеиванием необходимо создать поверхность с повышенной адгезионной активностью. Для этого с нее нужно удалить слабый поверхностный слой. Поверхность адгезива должна быть химически модифицирована для формирования адгезионно-активного и когезионно-упрочненного слоя. Во-вторых, необходимо повысить поверхностную энергию поверхностного слоя таким образом, чтобы она оказалась выше таковой используемого клея. В-третьих, должна быть улучшена топография поверхности полимера для того, чтобы обеспечить реализацию капиллярного эффекта. Главная задача, решаемая при этом, состоит в направленном повышении полярности поверхности полимера, прививки к ней полярных функциональных групп, способных к активному физико-химическому взаимодействию со связующим препрега. Для ПЭ, как и для других пластиков, существует два различных способа подготовки поверхности — физический и химический. Потенциально наиболее эффективные из них: обработка коронным разрядом, плазменная и пламенная обработки, «мокрые» химические методы обработки и грунтование поверхностей [70]. Обработка коронным разрядом представляет собой воздействие на поверхность неустойчивой плазмы при атмосферном давлении. Этот метод хорошо отработан в промышленном масштабе прежде всего при реализации технологии многослойных пленочных материалов (миллионы метров полимерной пленки ежегодно обрабатывают коронным разрядом) [69]. Существует несколько важных факторов, оказывающих влияние на процесс обработки. Во-первых, атмосферой, в которой обычно проводят обработку, является воздух. Обработка на воздухе обычно приводит к окислению поверхности. При этом нет необходимости в использовании каких-то специальных операций, кроме удаления озона из зоны обработки. Могут использоваться также и другие газовые среды. Вторым важным фактором является расход энергии. Важно не только регулировать электрическое напряжение, но и частоту тока, чтобы обеспечить равенство импеданса. В-третьих, скорость прохождения пленки (листа) под электродами также имеет большое значение в обеспечении эффективности способа.

В основе технологии пламенной обработки лежат контактный способ Критчевера (пат. США 2648097) и способ Крейдла, базирующийся на использовании только энергии, передаваемой за счет излучения (пат. ФРГ 844348). Пламенная обработка является второй после коронного разряда по показателю «площадь полиолефинов, обработанных в течение года». Технология подготовки поверхности при этом весьма проста: пластик перемещается под рядом под горелок, работающих преимуще-

щественно на природном газе. Важным моментом в работе установки для пламенной обработки является состав газовой среды, задаваемый соотношением между природным газом и воздухом в их смеси. В зависимости от содержания газа пламя может значительно отличаться по своим характеристикам. Как правило, центральный барабан охлаждают. Также важным моментом является расстояние горелок от пленки. Если горелки располагаются слишком близко, пленка может обугливаться. Если они размещены на слишком большом расстоянии, то степень модифицирования поверхности будет недостаточной. Имеет значение также скорость перемещения пленки относительно горелки.

Обработка плазмой атмосферного давления является для полимеров наиболее эффективным средством активации и обеспечения оптимальных адгезионных характеристик их поверхности, применение при этом сжатого воздуха сокращает издержки. Данный метод совместим с большинством серийных технологий при полном исключении использования жидких химических реактивов. Поэтому активация плазмой экологически безопасна. Процесс является одностадийным, гарантирует тончайшую очистку, компенсацию статического заряда на поверхности и ее направленную функционализацию.

Плазма представляет собой ионизированный газ с практически одинаковой плотностью отрицательных и положительных зарядов. Реакции, которые происходят в плазме, являются в основном свободнорадикальными и протекают в результате взаимодействия ионов и электронов плазмы с обрабатываемой поверхностью. Абсорбция поверхностью ультрафиолетового излучения плазмы может также приводить к протеканию реакций на поверхности. Энергия плазменного излучения составляет порядка 10^{16} эВ, которой достаточно для того, чтобы привести к разрушению углерод–углеродных связей в структуре макромолекул. Плазменная обработка пока еще редко используется в промышленном масштабе. Функционально эта технология отличается от пламенной обработки и обработки коронным разрядом тем, что плазменные установки работают при давлении ниже атмосферного. Это различие является также основной причиной, объясняющей, почему плазма не находит широкого применения для улучшения адгезии. Стоимость процесса обработки при давлении ниже атмосферного очень высока. Кроме того, работа установки в условиях неполного вакуума, естественно, требует периодичности процесса, что также уменьшает эффективность этой операции с точки зрения ее стоимости.

При всех трех способах — пламенной обработке, обработке коронным разрядом и плазменной обработке — обрабатываемая среда является неравновесной, возбужденной газообразной фазой. Так как рабочая часть пламени представляет собой плазму, находящуюся в атмосферных условиях, считают, что основным эффектом в результате газопламенной обработки является окисление обрабаты-

ваемой поверхности. Глубина обработки, т. е. толщина модифицированного поверхностного слоя, составляет от нескольких нанометров до нескольких микрометров.

Мокрые химические методы обработки поверхностей основываются на нанесении грунтов, повышающих поверхностную энергию полимеров. При этом на поверхность наносят покрытие, которое совместимо с полимером. Часто грунты необходимо наносить на подготовленную поверхность, обеспечивающую их адгезию к субстрату. Однако существуют и грунты, повышающие адгезию без дополнительной подготовки поверхности. По имеющимся данным мокрые химические методы обработки поверхности ССЛ в реальных технологиях производства лыж с применением ПЭ не используются.

При получении листовых заготовок для ССЛ проблема интенсификации межфазной адгезии может быть решена за счет применения двух или многослойных листов, один из которых имеет адгезионно-активную поверхность. Существует несколько способов получения двух- или многослойных полимерных листов: спрессовывание при нагревании и под давлением листовых заготовок из разнородных полимерных материалов, горячее каландрирование листовых заготовок (пропускание через зазор между обогреваемыми каландрами), соэкструзия нескольких плоских листовых заготовок через двух- или многоручьевую плоскощелевую головку с последующим охлаждением слоистого листа в воде или на охлаждаемом каландре, экструдирование расплава одного из компонентов на обогреваемый каландр через плоскощелевую головку и приформовывание к расплаву второго слоя в виде тонкого листа или пленки [71]. Последний способ является наиболее приемлемым и перспективным при реализации технологии тонкого листа на основе ПЭ, предназначенного для использования в качестве основы ССЛ, ввиду экономичности и высокой производительности, возможности совмещения стадий получения композита для ССЛ и его использования. Эффективность этого способа подтверждена, в частности, в патентной заявке [72]. Для практической реализации технологии не требуются значительные капитальные затраты, поскольку для компаундирования вполне пригодны серийные экструзионно-грануляционные линии на базе двухшнековых экструдеров, а также серийное трех- или четырехвалковое каландровое оборудование.

Заключение

Приведенные сведения об особенностях процессов трения в паре ССЛ–снег и конкурентном влиянии наполнителей на гидрофобность, трибологические, электро- и теплофизические характеристики полимерной основы ССЛ свидетельствуют о сложности объекта исследования и многофакторности явлений, определяющих поведение ССЛ в реальных условиях.

Анализ опубликованной информации позволяет в качестве перспективных направлений выделить работы по повышению гидрофобности ССЛ за счет применения литевых фторполимеров, сочетания химического модифицирования поверхности ПЭ перфторированными и другими соединениями олигомерной и полимерной природы с методами управления микро(нано) топографией и текстурирования поверхности в рамках концепции создания супергидрофобных антифрикционных поверхностей.

Представлен расчетный подход, заключающийся в предварительном прогнозировании совместимости (взаимной растворимости) грунтовочных слоев лыжных смазок и материала ССЛ.

Показана перспективность применения двух- или многослойных листовых заготовок для ССЛ, получаемых методом плоскощелевой экструзии, одна из поверхностей которых является адгезионно-активной по отношению к связующему армирующему препрега.

Обозначения

ДСК — дифференциальная сканирующая калориметрия; ИК — инфракрасная; КЖС — квазижидкий поверхностный слой; КР — комбинационное рассеяние; КУС — краевой угол смачивания; ЛПЭНП — линейный полиэтилен низкой плотности; ПВДФ — поливинилиденфторид; ПФФ — поливинилфторид; ПИ — полиимид; ПММА — полиметилметакрилат; ПП — полипропилен; ПТФЭ — политетрафторэтилен; ПФПАЭ — перфторированный полиалкилэфир; ПФПЭ — перфторполиэфир; ПЭ — полиэтилен; ПЭВП — полиэтилен высокой плотности; ПЭНП — полиэтилен низкой плотности; ПЭТ — полиэтилентерефталат; РФЭС — рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия; СВМПЭ — сверхвысокомолекулярный полиэтилен; ССЛ — слой скольжения лыж; ТУ — технический углерод; ТФЭ — тетрафторэтилен; ФУ — фторуглероды; ЭА — эрукамид; ЭТФЭ — сополимер этилена и тетрафторэтилена (Ф-40); H , МПа — твердость; N_A , моль⁻¹ — число Авогадро ($6,022 \cdot 10^{23}$); PFA — сополимер ТФЭ с перфторвинилпропиловым эфиром (Ф-50); R , Дж/моль·град — универсальная газовая постоянная; R_a , мкм — среднеквадратичное отклонение профиля; T , К — абсолютная температура; $T_{пл}$, °С — температура плавления; V , см³/моль — мольный объем материала; ΔE^* , Дж/моль — энергия когезии, уменьшенная во столько раз, во сколько ван-дер-ваальсов объем молекулы меньше мольного объема; ΔE_i^* , Дж/моль — вклад каждого атома и типа межмолекулярного взаимодействия в ΔE^* ; ΔH_0 , Дж/моль — скрытая теплота испарения вещества; ΔV_i , Å³ — ван-дер-ваальсовы объемы атомов i -ого вида; γ , дин/см — поверхностное натяжение; δ , (Дж см⁻³)^{0.5} — параметр растворимости Гильдебранда; δ^2 , Дж см⁻³ — плотность энергии когезии; θ , ° — краевой угол смачивания; μ — коэффициент

трения; $\mu_{дин}$ — динамический коэффициент трения; $\mu_{загр}$ — компонент коэффициента трения, обусловленный загрязнением поверхностного слоя под влиянием электризации; $\mu_{кан}$ — компонент коэффициента трения, связанный с гидродинамическим трением; $\mu_{пропах}$ — компонент коэффициента трения, связанный с уплотнением снега при движении по неподготовленной лыжне; $\mu_{см}$ — компонент коэффициента трения, связанный с граничным трением; $\mu_{стат}$ — статический коэффициент трения; $\mu_{сх}$ — компонент коэффициента трения, связанный с пластической деформацией без смазки; $\mu_{эл}$ — компонент коэффициента трения, обусловленный силами электростатического взаимодействия; τ , МПа — прочность на срез.

Литература

1. Полховский А. В., Прохорчик С. А., Шетько С. В., Современные конструкции и материалы для лыж // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 1. С. 163–168.
2. Colbeck S. C. A Review of the Processes That Control Snow Friction: CRREL Monograph 92-2. US, 1992. 48 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.google.com/url?sa=t&rc=t=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwip24GS3OHjAhUQp osKHR_kb7IQFjADegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fapps.dtic.mil%2Fdtic%2Ftr%2Ffulltext%2Fu2%2Fa252362.pdf&usq=AOvVaw24dfwHwU7UhmBz8M9i4Ryc (дата обращения: 01.06.2019).
3. Bowden F. P., Hughes T. P. The mechanism of sliding on snow and ice // Proc. R. Soc. Lond., Series A, 1939, vol. 172, pp. 280–298.
4. Evans D. C. B., Nye J. F., Cheeseman K. J. The kinetic friction of ice // Proc. R. Soc. Lond., Series A, 1976, vol. 347, pp. 493–512.
5. Faraday M. On regelation, and on the conservation of force // Philos. Mag., 1859, vol. 17, no. 113, pp. 162–169.
6. Kietzig A. M., Hatzikiriakos S. G., Englezos P. Physics of ice friction // J. Appl. Phys., 2010, vol. 107, pp. 081101.
7. Рыжкин И. А., Рыжкин М. И., Сеницын В. В., Клюев А. В. Модель квазижидкого поверхностного слоя льда // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 106, № 11. С. 724–728.
8. Ambach W., Mayr B. Ski gliding and water film // Cold Reg. Sci. Technol., 1981, vol. 5, pp. 59–65.
9. Strausky H., Krenn J. R., Leitner A., Aussenegg F. R. Sliding plastics on ice: fluorescence spectroscopic studies on interfacial water layers in the μm thickness regime // Applied Physics B, 1998, vol. 66, pp. 599–602.
10. Bäurle L., Szabó D., Fauve M., Rhyner H., Spencer N. D. Sliding friction of polyethylene on ice: tribometer measurements // Trib. Lett., 2006, vol. 24, no. 1, pp. 77–84.
11. Lever J. H., Taylor S., Hoch G. R., Daghlian C. Evidence that abrasion can govern snow kinetic friction // J. Glaciol., 2018, pp. 1–17. doi: 10.1017/jog.2018.97
12. Lever J. H., Taylor S., Song A. J., Courville Z. R., Lieblappen R., Weale J. C. The mechanics of snow friction as revealed by micro-scale observations // J. Glaciol., 2018, vol. 64, no. 243, pp. 27–36. doi: 10.1017/jog.2017.76
13. Ducret S., Zahouani H., Midol A., Lanteri P., Mathia T. G. Friction and abrasive wear of UHMWPE sliding on ice // Wear, 2005, vol. 258, pp. 26–31.
14. Kuzmin L., Fuss F. K. Cross-country ski technology // Routledge Handbook of Sports Technology and Engineering. London; New-York: Taylor and Fransis group, 2013, pp. 171–188.
15. Fauve M., Buhl D., Rhyner M., Schneeleli M., Ammann W. Influence of Snow and Weather Characteristics on the Gliding Properties of Skis // Science and Skiing III. Oxford: Meyer & Meyer Sport, 2005, pp. 401–410.
16. Buhl D., Fauve M., Rhyner H. The kinetic friction of polyethylene on snow: the influence of the snow temperature and the load // Cold Reg. Sci. Technol., 2001, vol. 33, pp. 133–140.
17. Stamboulides C., Englezos P., Hatzikiriakos S. G. The ice friction of polymeric substrates // Trib. Int., 2012, vol. 55, pp. 59–67.

18. Бартнев Г. М., Лаврентьев В. В. Трение и износ полимеров. Л.: Химия, 1972. 240 с.
19. Белый В. А., Свириденко А. И., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. Минск: Наука и Техника, 1976. 198 с.
20. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2018, vol. 1, is. 1, pp. 3–39.
21. Giesbrecht J. L., Smith P., Tervoort T. A. Polymers on Snow: Toward Skiing Faster // *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, 2010, vol. 48, pp. 1543–1551.
22. Giesbrecht J. L. Polymers on snow Towards skiing faster: PhD. diss. ETH no. 18857 Zurich, 2010 [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-006042752> (дата обращения: 1.06.2019).
23. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел / пер. с англ. под ред. Крагельского И. В. М.: Машиностроение, 1964. 544 с.
24. Nordic Technical Manual [Электронный ресурс]. URL: https://issuu.com/fischersportsgmbh/docs/w20318_engl_xc-tm (дата обращения: 09.07.2019).
25. ISOSPORT [Электронный ресурс]. URL: <https://www.isosport.com/en/downloads/isospeed-bases> (дата обращения: 01.05.2019).
26. Беговые лыжи Фишер: на вопросы читателей журнала «Лыжный спорт» отвечает руководитель отдела по разработке гоночных лыж компании «Fischer» Ханс Хубингер // *Лыжный спорт*. 2013. № 60 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.skisport.ru/magazine/60> (дата обращения: 01.05.2019).
27. Fischer J., Wallner G. M., Pieber A. Morphology of polyethylene ski base materials // *J. Sports Sci.*, 2010, vol. 28, no. 5, pp. 555–562. doi: 10.1080/02640411003628055
28. Colbeck S. C., Perovich D. K. Temperature effects of black versus white polyethylene bases for snow skis // *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2004, vol. 39, pp. 33–38.
29. Адерица В. Н., Шаповалов В. А., Песецкий С. С. О связи динамических механических свойств и скорости абразивного изнашивания частично кристаллических полимеров // *Докл. НАН Беларуси*. 2013. Т. 57, № 5. С. 102–107.
30. Yekta-Fard M., Ponter A. B. Factors affecting the wettability of polymer surfaces // *J. Adhes. Sci. Technol.*, 1992, vol. 6, p. 253–277.
31. Kuzmin L., Carlsson P., Tinnsten M. The relationship between the type of machining of the ski running-surface and its wettability and capillary drag // *Sports Technol.*, 2010, vol. 3, no. 2, pp. 121–130. doi: 10.1080/19346182.2010.538399
32. Colbeck S. C. Electrical charging of skis gliding on snow // *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1995, vol. 27, no. 1, pp. 136–141.
33. Arakawa M., Petrenko V. F., Chen C. Effect of direct- and alternating current electric fields on friction between ice and metals // *Can. J. Phys.*, 2003, vol. 81, pp. 209–216.
34. Fischer J., Wallner G. M., Pieber A. Spectroscopical Investigation of Ski Base Materials // *Macromol. Symp.*, 2008, vol. 265, pp. 28–36.
35. Kuzmin L., Tinnsten M. Contact angles on the running surfaces of cross-country skis // *The Impact of Technology on Sport: Proceedings of the Asia-Pacific Congress on Sports Technology / eds A. Subic, S. Ujhashi. Tokyo, 2005, pp. 318–323.*
36. Герасимов Н. П. Использование фторопластовой скользящей поверхности для повышения эффективности скольжения беговых лыж // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2015. Т. 38, № 7. С. 10–12 [Электронный ресурс]. URL: www.research-journal.org (дата обращения: 09.09.2019).
37. Bogoslov E. A., Gerasimov N. P., Danilaev M. P., Mikhailov S. A., Polsky Y. E., Bogomolova O. Y. Efficiency of Teflon Sliding Surface International // *J. Sports Sci.*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 224–228. doi: 10.5923/j.sports.20130306.07
38. Пугачев А. К. Переработка фторопластов в изделия. Технология и оборудование. Л.: Химия, 1987, 168 с.
39. Шадрин Н. В., Попов С. Н., Антоев К. П., Христофорова А. А. Исследование работоспособности полимерных материалов в условиях трения со льдом и снегом // *Науч. журн. КубГАУ*. 2015. Т. 3. № 107. [Электронный ресурс]. URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/03/pdf/40.pdf> (дата обращения: 09.09.2019).
40. Puukilainen E., Pakkanen T. A. Modification of surface properties of polyethylene by perfluoropolyether blending // *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, 2005, vol. 43, pp. 2252–2258.
41. Stamboulides C., Englezos P., Hatzikiriakos S. G. Ice friction of ultra-high molecular weight polyethylene: The effects of fluorine additives and plasma (PECVD) treatment // *Trib. Int.*, 2013, vol. 57, pp. 177–183.
42. Rogowski I., Leonard D., Gauvrit J.-Y., Lanteri P. Influence of fluorine-based additive content on the physical and physico-chemical properties of ski gliding wax // *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2007, vol. 49, pp. 145–150.
43. Applications of Fluorinated Additives for Lubricants // *Fluoropolymer Additives / ed. Ebnesajjad S., Morgan R. Netherlands: Elsevier, 2019, ch. 6, pp. 75–119.*
44. Sinha S. K., Lee C. B., Lim S. C., Tribological Performance of UHMWPE and PFPE Coated Films on Aluminium Surface // *Tribol. Lett.*, 2008, vol. 29, pp. 193–199.
45. Breitschade F., Haaland N., Espallarga N. A tribological study of UHMWPE ski base treated with nano ski wax and its effects and benefits on performance // *Procedia Engineering*, 2014, vol. 72, pp. 267–272.
46. Haaland N. H. Nano ski wax, effects and benefits: MSc. Thesis. Trondheim, 2013. 113 p.
47. Cohen S. C., Tabor, D. The friction and lubrication of polymers // *Proc. of the Royal Soc., A*, 1966, vol. 291, pp. 186–207.
48. Silvano J. R., Boca Santa R. A. A., Marcon Martins Maria A. P., Riella H. G., Soares C., Antônio Fiori M. Nanocomposite of erucamide-clay applied for the control of friction coefficient in surfaces of LLDPE // *Polymer Testing*, 2018, vol. 67, pp. 1–6.
49. Бойнович Л. Б., Емельяненко А. М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применения // *Усп. химии*. 2008. Т. 77, № 7. С. 619–638.
50. Nordin N. A., Styring P. Superhydrophobic Ski Bases for Reduced Water Adhesion // *Procedia Engineering*, 2014, vol. 72, pp. 605–610.
51. Нефедов Н. И. Гидрофобные покрытия на основе фторолигомеров для защиты элементов конструкций: дисс. канд. техн. наук: 05.16.09. Москва, 2017. 142 с.
52. Нефедов Н. И., Хасков М. А., Петров А. П., Бузник В. М. Исследование термических свойств фторпарафинов и гидрофобных покрытий на их основе // *Труды ВИАМ*. 2017. Т. 52, № 2. С. 96–106.
53. Puukilainen E., Koponen H.-K., Xiao Z., Suvanto S., Pakkanen T. A. Nanostructured and chemically modified hydrophobic polyolefin surfaces // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2006, vol. 287, pp. 175–181.
54. Камус [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BC%D1%83%D1%81> (дата обращения: 01.02.2019).
55. Skin Skis: Why this No-Wax Revolution is on the Rise by Cross Country Ski Headquarters. October 17, 2017 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cross-country-ski.com/skin-skis-no-wax-revolution-rise/> (дата обращения: 1.03.2019).
56. YOKO [Электронный ресурс]. URL: <https://yoko.fi/products/11-15671-000> (дата обращения: 1.03.2019).
57. Грушин А. А. Как подготовить лыжи // *Лыжный спорт*, 1997, № 5. С. 7.
58. Кузьмин Л. Грунтовка и смазка лыж с пластиковым покрытием // *Лыжный спорт*, 1997, № 10, С. 17–20.
59. Браун Н. Подготовка лыж: полное руководство. Мурманск, 2004, 168 с.
60. Смирнов А. А. Искусство и основные принципы смазки лыж: учебное пособие. М.: Физкультура и спорт. 2006. 90 с.
61. Бусарин А. Г. Фтористые смазки в подготовке скользящей поверхности гоночных лыж // *Педагогико-психологические и медико-биологические проблемы физической культуры и спорта*. 2007. Т. 2, № 2. С. 203–209.
62. Бусарин А. Г. Влияние технологии подготовки гоночных лыж на эффективность тренировочного и соревновательного процесса квалифицированных лыжников-гонщиков: автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Набережные Челны, 2009, 23 с.
63. Бусарин А. Г. Влияние технологии подготовки гоночных лыж на спортивный результат квалифицированных лыжников-гонщиков // *Актуальные вопросы подготовки лыжников-гонщиков высокой квалификации: материалы всероссийской научно-практической конференции, 17–20 мая 2011 г. Смоленск. Смоленск, 2011. С. 35–37.*
64. Madsen T. H. Minimizing Ski Friction through Nanostructured Hydrophobic Surfaces: Master of Science in Mechanical Engi-

- neering Supervisor. Trondheim, 2018. 189 с.
65. Кревелен Д. В. ван. Свойства и химическое строение полимеров: пер. с англ. / под редакцией А. Я. Малкина. 1976. Москва: Химия, 416 с.
 66. Аскадский А. А., Матвеев Ю. И. Химические и физические свойства полимеров. М.: Химия, 1983. 248 с.
 67. Полимерные смеси. Т. 2. / под ред. Д. Пола, С. Ньюмена. М.: Мир, 1981. 453 с.
 68. Кнунянц И. Л., Фокин А. В. Химия фторуглеродов // Наука и человечество. 1964. М.: Знание, 1964. С. 280–300.
 69. Поциус А. Клеи. Адгезия. Технология склеивания / пер. с англ. под ред. Комарова Г. В. СПб.: Профессия, 2007. 376 с.
 70. Бабаевский П. Г., Тростянская Е. Б. Поверхностная энергия отвержденных эпоксидных смол // Высокомолек. соед. 1975. № 4. С. 906–912.
 71. Крыжановский В. К., Кербер М. А., Бурлов В. В., Паннатченко А. Д. Производство изделий из полимерных материалов. СПб.: Профессия, 2004. 464 с.
 72. Заявка а 20190259 РБ. Способ получения двухслойного тонкого листа на основе полиэтилена / Песецкий С. С., Коваль В. Н., Герасименко С. А., Адериха В. Н., Кривогуз Ю. М. Заявл. 05.09.2019.
- ## References
1. Polkhovskiy A. V., Prokhorchik S. A., Shet'ko S. V., Sovremennye konstruktivnyye materialy dlya lyzh [Modern constructions and materials for ski]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых resursov* [Proceedings of BSTU. 1], 2019, no. 1, pp. 163–168.
 2. Colbeck S. C. A Review of the Processes That Control Snow Friction: CRREL Monograph 92-2. US, 1992. 48 p. Available at: https://www.google.com/url?sa=t&rcrct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwip24GS30HjAhUQposKH_R_kB7IQFjADegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fapps.dtic.mil%2Fdtic%2Ftr%2Ffulltext%2Fu%2F2Fa252362.pdf&usq=A0vVaw24dfwHwU7UhmBz8M9i4Ryc (accessed 1.06.2019).
 3. Bowden F. P., Hughes T. P. The mechanism of sliding on snow and ice. *Proc. R. Soc. Lond., Series A*, 1939, vol. 172, pp. 280–298.
 4. Evans D. C. B., Nye J. F., Cheeseman K. J. The kinetic friction of ice. *Proc. R. Soc. Lond., Series A*, 1976, vol. 347, pp. 493–512.
 5. Faraday M. On regelation, and on the conservation of force. *Philos. Mag.*, 1859, vol. 17, no. 113, pp. 162–169.
 6. Kietzig A. M., Hatzikiriakos S. G., Englezos P. Physics of ice friction. *J. Appl. Phys.*, 2010, vol. 107, pp. 081101.
 7. Ryzhkin I. A., Ryzhkin M. I., Sinitsyn V. V., Klyuev A. V. Model' kvazizhidkogo poverkhnostnogo sloya l'da [Model of a Surface Liquid-Like Layer of Ice]. *Pis'ma v ZhETF* [JETP letters], 2017, vol. 106, no. 11, pp. 724–728.
 8. Ambach W., Mayr B. Ski gliding and water film. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 1981, vol. 5, pp. 59–65.
 9. Strausky H., Krenn J. R., Leitner A., Aussenegg F. R. Sliding plastics on ice: fluorescence spectroscopic studies on interfacial water layers in the μm thickness regime. *Applied Physics. B*, 1998, vol. 66, pp. 599–602.
 10. Bäurle L., Szabó D., Fauve M., Rhyner H., Spencer N. D. Sliding friction of polyethylene on ice: tribometer measurements. *Trib. Lett.*, 2006, vol. 24, no. 1, pp. 77–84.
 11. Lever J. H., Taylor S., Hoch G. R., Daghighian C. Evidence that abrasion can govern snow kinetic friction. *J. Glaciol.*, 2018, pp. 1–17. doi: 10.1017/jog.2018.97
 12. Lever J. H., Taylor S., Song A.J., Courville Z. R., Lieblappen R., Weale J. C. The mechanics of snow friction as revealed by micro-scale observations. *J. Glaciol.*, 2018, vol. 64, no. 243, pp. 27–36. doi: 10.1017/jog.2017.76
 13. Ducret S., Zahouani H., Midol A., Lanteri P., Mathia T. G. Friction and abrasive wear of UHMWPE sliding on ice. *Wear*, 2005, vol. 258, pp. 26–31.
 14. Kuzmin L., Fuss F. K. Cross-country ski technology. *Routledge Handbook of Sports Technology and Engineering*. London; New York: Taylor and Francis group, 2013, pp. 171–188.
 15. Fauve M., Buhl D., Rhyner M., Schneeleli M., Ammann W. Influence of Snow and Weather Characteristics on the Gliding Properties of Skis. *Science and Skiing III*. Oxford: Meyer & Meyer Sport, 2005, pp. 401–410.
 16. Buhl D., Fauve M., Rhyner H. The kinetic friction of polyethylene on snow: the influence of the snow temperature and the load. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2001, vol. 33, pp. 133–140.
 17. Stamboulides C., Englezos P., Hatzikiriakos S. G. The ice friction of polymeric substrates. *Trib. Int.*, 2012, vol. 55, pp. 59–67.
 18. Bartenev G. M., Lavrent'ev V. V. *Trenie i iznos polimerov* [Friction and wear of polymers]. Leningrad: Khimiya Publ., 1972. 240 p.
 19. Bely V. A., Sviridenok A. I., Petrokovets M. I., Savkin V. G. *Trenie i iznos materialov na osnove polimerov* [Friction and wear of materials based on polymers]. Minsk: Nauka i Tekhnika Publ., 1976. 198 p.
 20. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2018, vol. 1, is. 1, pp. 3–39.
 21. Giesbrecht J. L., Smith P., Tervoort T. A. Polymers on Snow: Toward Skiing Faster. *J. Polym. Sci., Part B: Polym. Phys.*, 2010, vol. 48, pp. 1543–1551.
 22. Giesbrecht J. L. Polymers on snow Towards skiing faster: PhD. diss. ETH no. 18857 Zurich, 2010. Available at: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-006042752> (accessed 1.06.2019).
 23. Bouden F. P., Teybor D. *Trenie i smazka tverdykh tel* [Friction and lubrication of solids]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1964. 544 p.
 24. Nordic Technical Manual. Available at: https://issuu.com/fischersportsgmbh/docs/w20318_engl_xc-tm (accessed 09.07.2019).
 25. ISOSPORT. Available at: <https://www.isosport.com/en/downloads/isospeed-bases> (accessed 01.05.2019).
 26. Begovyte lyzhi Fisher: na voprosy chitateley zhurnala "Lyzhnyy sport" otvechaet rukovoditel' otдела po razrabotke gonochnykh lyzh kompanii "Fischer" Khans Khubinger [Hans Houbinger, the head of the Fischer cross-country ski department answers the questions of the magazine readers]. *Lyzhnyy sport*, 2013, no. 60. Available at: <https://www.skisport.ru/magazine/60>, дата доступа 5.04.2019 (accessed 01.05.2019).
 27. Fischer J., Wallner G. M., Pieber A. Morphology of polyethylene ski base materials. *J. Sports Sci.*, 2010, vol. 28, no. 5, pp. 555–562. doi: 10.1080/02640411003628055
 28. Colbeck S. C., Perovich D. K. Temperature effects of black versus white polyethylene bases for snow skis. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2004, vol. 39, pp. 33–38.
 29. Aderikha V. N., Shapovalov V. A., Pesetskiy S. S. O svyazi dinamicheskikh mekhanicheskikh svoystv i skorosti abrazivnogo iznashivaniya chastichno kristallicheskikh polimerov [On relation between the dynamic mechanical properties and abrasive wear rate of semicrystalline polymers]. *Doklady NAN Belarusi* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus], 2013, vol. 57, no. 5, pp. 102–107.
 30. Yekta-Fard M., Ponter A. B. Factors affecting the wettability of polymer surfaces. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 1992, vol. 6, p. 253–277.
 31. Kuzmin L., Carlsson P., Tinnsten M. The relationship between the type of machining of the ski running-surface and its wettability and capillary drag. *Sports Technol.*, 2010, vol. 3, no. 2, pp. 121–130. doi: 10.1080/19346182.2010.538399
 32. Colbeck S. C. Electrical charging of skis gliding on snow. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 1995, vol. 27, no. 1, pp. 136–141.
 33. Arakawa M., Petrenko V. F., Chen C. Effect of direct- and alternating current electric fields on friction between ice and metals. *Can. J. Phys.*, 2003, vol. 81, pp. 209–216.
 34. Fischer J., Wallner G. M., Pieber A. Spectroscopical Investigation of Ski Base Materials. *Macromol. Symp.*, 2008, vol. 265, pp. 28–36.
 35. Kuzmin L., Tinnsten M. Contact angles on the running surfaces of cross-country skis. The Impact of Technology on Sport: Proceedings of the Asia-Pacific Congress on Sports Technology. Eds A. Subic, S. Ujhashi. Tokyo, 2005, pp. 318–323.
 36. Gerasimov N. P. Ispol'zovanie ftoroplastovoy skol'zyashchey poverkhnosti dlya povysheniya effektivnosti skol'zheniya begovykh lyzh [Using of teflon sliding skis surface for cross-country skis sliding efficiency increase]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2015, vol. 38, no. 7, pp. 10–12. Available at: www.research-journal.org. (accessed 09.09.2019).
 37. Bogoslov E. A., Gerasimov N. P., Danilaev M. P., Mikhailov S. A., Polsky Y. E., Bogomolova O. Y. Efficiency of Teflon Sliding Surface Internationalo *J. Sports Sci.*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 224–228. doi: 10.5923/j.sports.20130306.07
 38. Pugachev A. K. *Pererabotka ftoroplastov v izdeliya. Tekhnologi-*

- ya i oborudovanie [Processing of parts from fluoropolymers]. Leningrad: Khimiya Publ., 1987, 168 p.
39. Shadrinov N. V., Popov S. N., Antoev K. P., Khristoforova A. A. Issledovanie rabotosposobnosti polimernykh materia-lov v usloviyakh treniya so l'dom i snegom [Study of polymeric materials performance in friction conditions with ice and snow]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*, 2015, vol. 3, no. 107. Available at: <http://ej.kubagro.ru/2015/03/pdf/40.pdf> (accessed 09.09.2019).
 40. Puukilainen E., Pakkanen T. A. Modification of surface properties of polyethylene by perfluoropolyether blending. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, 2005, vol. 43, pp. 2252–2258.
 41. Stamboulides C., Englezos P., Hatzikiriakos S. G. Ice friction of ultra-high molecular weight polyethylene: The effects of fluorine additives and plasma (PECVD) treatment. *Trib. Int.*, 2013, vol. 57, pp. 177–183.
 42. Rogowski I., Leonard D., Gauvrit J.-Y., Lanteri P. Influence of fluorine-based additive content on the physical and physico-chemical properties of ski gliding wax. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2007, vol. 49, pp. 145–150.
 43. Applications of Fluorinated Additives for Lubricants. *Fluoropolymer Additives*. Netherlands: Elsevir Publ., 2019, ch. 6, pp. 75–119.
 44. Sinha S. K., Lee C. B., Lim S. C., Tribological Performance of UHMWPE and PFPE Coated Films on Aluminium Surface. *Tribol. Lett.*, 2008, vol. 29, pp.193–199.
 45. Breitschade F., Haaland N., Espallarga N. A tribological study of UHMWPE ski base treated with nano ski wax and its effects and benefits on performance. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 72, pp. 267–272.
 46. Haaland N. H. Nano ski wax, effects and benefits: MSc. Thesis. Trondheim, 2013. 113 p.
 47. Cohen S. C., Tabor, D. The friction and lubrication of polymers // Proc. of the Royal Soc., A, 1966, vol. 291, pp. 186–207.
 48. Silvano J. R., Boca Santa R. A. A., Marcon Martins Maria A. P., Riella H. G., Soares C., Antônio Fiori M. Nanocomposite of erucamide-clay applied for the control of friction coefficient in surfaces of LLDPE. *Polymer Testing*, 2018, vol. 67, pp. 1–6.
 49. Boynovich L. B., Emel'yanenko A. M. Gidrofobnye materialy i pokrytiya: printsipy sozdaniya, svoystva i primeneniya [Hydrophobic materials: principles of design, properties and application]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2008, vol. 77, no. 7, pp. 619–638.
 50. Nordin N. A., Styring P. Superhydrophobic Ski Bases for Reduced Water Adhesion. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 72, pp. 605–610.
 51. Nefedov N. I. Gidrofobnye pokrytiya na osnove ftoroligomerov dlya zashchity elementov konstruksiy: diss. kand. tekhn. Nauk [Hydrophobic coatings based on fluorooligomers for protection of construction parts. PhD. eng. sci. diss.]. Moscow, 2017. 142 p.
 52. Nefedov N. I., Khaskov M. A., Petrov A. P., Buznik V. M. Issledovanie termicheskikh svoystv ftoroparafinov i gidro-fobnykh pokrytiy na ikh osnove [Investigation of the thermal properties of fluoroparaffins and hydrophobic coatings on their basis]. *Trudy VIAM*, 2017, vol. 52, no. 2, pp. 96–106.
 53. Puukilainen E., Koponen H.-K., Xiao Z., Suvanto S., Pakkanen T. A. Nanostructured and chemically modified hydrophobic polyolefin surfaces. *Colloids and Surfaces. A: Physicochem. Eng. Aspects*, 2006, vol. 287, pp. 175–181.
 54. Kamus [Climbing skins]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B0%D0%BC%D1%83%D1%81> (accessed 01.02.2019).
 55. Skin Skis: Why this No-Wax Revolution is on the Rise by Cross Country Ski Headquarters. October 17, 2017. Available at: <https://www.cross-country-ski.com/skin-skis-no-wax-revolution-rise/> (accessed 01.03.2019).
 56. YOKO. Available at: <https://yoko.fi/products/11-15671-000> (accessed 01.03.2019).
 57. Grushin A. A. Kak podgotovit' lyzhi [How to prepare skis]. *Lyzhnyy sport*, 1997, no. 5, pp. 7.
 58. Kuz'min L. Gruntovka i smazka lyzh s plastikovym pokrytiem [Application of a primer and grease onto the plastic ski base]. *Lyzhnyy sport*, 1997, no. 10, pp. 17–20.
 59. Braun N. *Podgotovka lyzh* [Preparation of skis]. Murmansk, 2004, 168 p.
 60. Smirnov A. A. Iskusstvo i osnovnye printsipy smazki lyzh [The art and basic principles of ski lubrication: tutorial]. Moscow: Fizkul'tura i sport Publ., 2006, 90 p.
 61. Busarin A. G. Ftorstyie smazki v podgotovke skol'zyashchey poverkhnosti gonochnykh lyzh [Fluoric lubricants for preparation of sliding surface of racing skis]. *Pedagogiko-psikhologicheskie i mediko-biologicheskie problemy fizicheskoy kul'tury i sporta* [The Russian Journal of Physical Education and Sport], 2007, vol. 2, no. 2, pp. 203–209.
 62. Busarin A. G. Vliyanie tekhnologii podgotovki gonochnykh lyzh na effektivnost' trenirovochnogo i sorevnoval'nogo protsessa kvalifitsirovannykh lyzhnikov-gonshchikov. Avtoref. diss. kand. tekhn. Nauk [Influence of technology of preparation of racing skis on efficiency of training and competitive process of the qualified skiers-racers. PhD. eng. sci. abstract diss.]. Naberezhnye Chelny, 2009, 23 p.
 63. Busarin A. G. Vliyanie tekhnologii podgotovki gonochnykh lyzh na sportivnyy rezul'tat kvalifitsirovannykh lyzhnikov-gonshchikov [Influence of technology of preparation of racing skis on sports result of the qualified skiers-racers]. *Materialy vsrossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nye voprosy podgotovki lyzhnikov-gonshchikov vysokoy kvalifikatsii»* [Proceedings of the all-Russian scientific and practical conference "Topical issues of training skiers of high qualification"]. Smolensk, 2011, pp. 35–37.
 64. Madsen T. H. Minimizing Ski Friction through Nanostructured Hydrophobic Surfaces: Master of Science in Mechanical Engineering Supervisor. Norwegian, 2018, 189 p.
 65. Krevelen D. V. van. Svoystva i khimicheskoe stroenie polimerov [Properties of Polymers Correlations with Chemical Structure]. Moscow: Khimiya Publ., 1976. 416 p.
 66. Askadskiy A. A., Matveev Yu. I. *Khimicheskie i fizicheskie svoystva polimerov* [Chemical and physical properties of polymers]. Moscow: Khimiya Publ., 1983. 248 p.
 67. *Polimernye smesi. T. 2* [Polymer blends. Vol. 2]. Ed. D. Pol, S. N'yumen. Moscow: Mir Publ., 1981. 453 p.
 68. Knunyants I. L., Fokin A. V. Khimiya ftorglerodov [Chemistry of fluorocarbons]. *Nauka i chelovechestvo 1964* [Science and humanity]. Moscow: Znanie Publ., 1964, pp. 280–300.
 69. Potsius A. *Klei. Adgeziya. Tekhnologiya skleivaniya* [Technology of bonding]. Saint-Petersburg: Professiya Publ., 2007. 376 p.
 70. Babaevskiy P. G., Trostyanskaya E. B. Poverkhnostnaya energiya otverzhennykh epoksidnykh smol [Surface energy of crosslinking epoxy resins]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [Polymer Science], 1975, no. 4, pp. 906–912.
 71. Kryzhanovskiy V. K., Kerber M. A., Burlov V. V., Panimatchenko A. D. *Proizvodstvo izdeliy iz polimernykh materialov* [Production of articles from polymer materials]. Saint-Petersburg: Professiya Publ., 2004. 464 p.
 72. Pesetskii S. S., Koval' V. N., Gerasimenko S. A., Adrikha V. N., Krivoguz Yu. M. Sposob polucheniya dvukhsloynogo tonkogo lista na osnove polietilena [The method of producing two layered thin foils based on polyethylene]. Patent RB, № a 20190259, 2019.

Поступила в редакцию 10.09.2019

© В. Н. Адери́ха, С. С. Песе́цкий, 2019