

УДК 536.12

БАЛАКИН В. А.

СКОЛЬЖЕНИЕ КОНЬКА ПО ЛЬДУ

Сопротивление скольжению конька по льду зависит от давления, скорости скольжения, температуры окружающей среды, температуры, состояния и свойств поверхностных слоев льда, геометрии и свойств материала лезвия, а также от положения лезвия по отношению к поверхности льда [1—3]. Взаимодействие конька со льдом в процессе бега конькобежца происходит в основном по двум контактными схемам:

при перпендикулярности лезвия к поверхности льда во время скольжения конькобежца по инерции после отталкивания;

при расположении лезвия под углом к поверхности льда в процессе отталкивания.

На прямолинейных участках катка суммарная продолжительность скольжения конькобежца по инерции превышает суммарную продолжительность отталкивания. На виражах фаза отталкивания возрастает, а фаза скольжения уменьшается.

Таким образом, анализ процессов фрикционно-контактного взаимодействия конька со льдом должен включать в себя рассмотрение обеих схем.

С позиции молекулярно-механической теории сила трения в зоне контакта лезвие—лед обусловлена сопротивлением на сдвиг тонких поверхностных слоев льда и адгезией льда к лезвию конька на площади фактического контакта.

Контактное взаимодействие лезвия конька со льдом сопровождается фрикционным тепловыделением, нагревом и оплавлением льда, образованием пленки воды, выполняющей роль смазки.

Существенное влияние на процессы теплообмена между лезвием конька и льдом оказывает температура воздуха и поверхности льда.

Если температура воздуха и температура поверхности льда отрицательные, то интенсивность фрикционного тепловыделения в виде тепловых потоков на границе контакта лезвие—лед распределяется следующим образом: часть теплоты трения направлена на фрикционный нагрев и оплавление льда; другая часть — в лезвие конька и далее в окружающую среду.

Если температура воздуха положительная, а температура льда отрицательная (например, в закрытых катках с искусственным льдом), то как теплота трения, так и теплота от нагреваемого конвекцией (воздухом) лезвия направляются со стороны скользящего контакта в лед. Суммарный тепловой эффект в этом случае снижает сопротивление скольжению конька по льду и объясняет природу существующего у специалистов понятия «очень скользкий лед».

Характер условий соревнований должен накладывать свой отпечаток и на оптимальную конструкцию лезвия конька.

Прямолинейное длинное лезвие является оптимальной формой при беге по прямым участкам. Однако достижение некоторой предельной для

конькобежца скорости скольжения ставит перед ним вопрос об устойчивости прохождения виража. Вираж легче проходить на криволинейном лезвии, чем на прямолинейном. Но криволинейное лезвие при скольжении конькобежца по инерции после отталкивания на прямолинейных участках катка обладает повышенным (по сравнению с прямолинейным лезвием) сопротивлением скольжению и требует от конькобежца (для

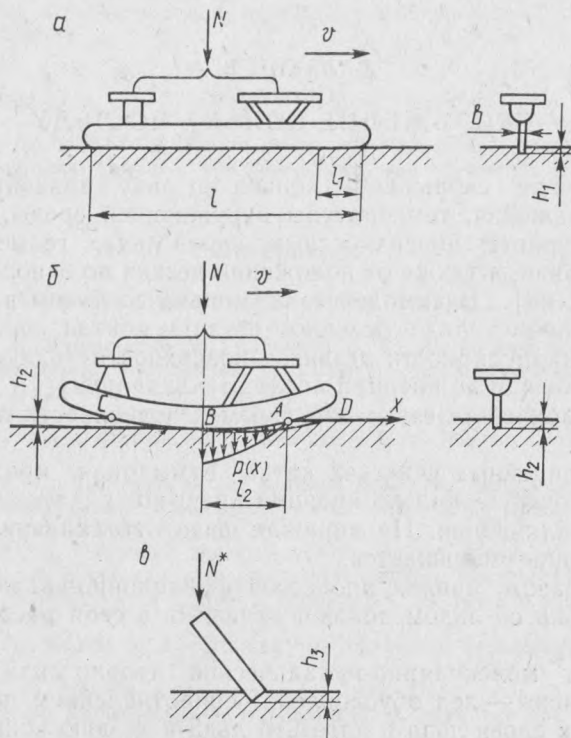


Рис. 1. Контакт прямолинейного (а), криволинейного лезвия конька со льдом (б) и контакт лезвия со льдом ребром (в)

сохранения высокой скорости) увеличения частоты отталкиваний, а следовательно, и возрастания мускульных затрат.

Таким образом, в зависимости от условий соревнований (температуры воздуха и льда, состояния поверхности льда), а также от физической и технической подготовки спортсмена могут быть подобраны оптимальные (с точки зрения получения наилучшего результата) варианты конструкции лезвия конька.

Рассмотрим схему контакта прямолинейного лезвия конька со льдом в процессе скольжения по инерции (рис. 1, а). В передней зоне лезвия длиной l_1 в результате фрикционного нагрева температура поверхности льда повышается от начальной до его температуры плавления.

При скольжении лезвие режет во льду канавку площадью $b \times h_1$, сопротивление резания (деформирования поверхностных слоев) льда

$$T_{\text{д}} = \sigma b h_1.$$

Величину σ можно выразить через такую механическую характеристику льда, как его твердость:

$$\sigma = k \text{НЛ}.$$

Адгезионная составляющая силы трения равна

$$T_a = bl.$$

Таким образом, в соответствии с молекулярно-механической теорией трения сила трения определится как

$$T = \tau bl + k \text{НЛ} bh_1. \quad (1)$$

Видно, что сопротивление скольжению зависит от твердости льда, адгезии льда и воды к полозу, соотношений между l , b , h_1 .

Формулу (1) можно переписать в виде

$$T = \tau_1 bl_1 + \tau_2 b(l - l_1) + k \text{НЛ} bh_1. \quad (2)$$

Очевидно, что $\tau_1 > \tau_2$. Из формулы (2) видно, что чем меньше l_1 по сравнению с $l - l_1$, тем меньше адгезионная составляющая силы трения.

На рис. 1, б представлена схема контакта криволинейного лезвия конька со льдом в процессе скольжения по инерции.

В случае скольжения прямолинейного лезвия конька по льду (рис. 1, а) контакт лезвия со льдом происходит по всей длине прямолинейного участка l , среднее давление конька на лед равно N/bl , величина h_1 относительно невелика.

В случае же скольжения криволинейного лезвия конька по льду (рис. 1, б) контакт лезвия со льдом происходит в передней относительно вертикальной оси части лезвия, в задней же части лезвия на льду остается канавка, там контакта нет (лед — тело неупругое). Длина контактной зоны l_2 существенно меньше l . Эпюра давления $p(x)$ имеет криволинейный характер: от $p=0$ в передней точке контакта до p_{\max} на вертикальной оси. Среднее давление в зоне контакта полоз—лед составляет

$$p_{cp} = N/bl_2.$$

Если ширина лезвия конька b в обоих случаях одинакова, то h_2 будет существенно больше h_1 , так как

$$\frac{N}{bl_2} > \frac{N}{bl}.$$

Сила трения в этом случае обусловлена процессами деформирования льда в зоне ABD , а также адгезией льда и воды к полозу по поверхности контакта (по линии AB). В зоне ABD происходит образование трещин, скольжение между отдельными кристалликами льда, межкристаллитное плавление.

Величину силы трения можно представить в виде суммы

$$T = \tau_1 bl_2 + k \text{НЛ} bh_2$$

или

$$T = \tau_1 \frac{N}{\text{НЛ}} + k \text{НЛ} bh_2.$$

Рассмотрим схему контакта лезвия конька со льдом в положении ребром при отталкивании (рис. 1, в).

При таком положении лезвия по отношению ко льду величина внедрения h_3 превышает значения h_2 и h_1 , а следовательно, сила трения возрастает.

У конька с криволинейным лезвием при отталкивании длина зоны контакта составляет $2l_2$ (см. рис. 1, б), у конька с прямолинейным лезвием — l . Поскольку $l > 2l_2$, величина внедрения h_3 у конька с криволинейным лезвием больше, чем у конька с прямолинейным лезвием. Это объясняет причину повышенной устойчивости скольжения спортсмена на виражах на коньках с криволинейным лезвием.

В зоне контакта лезвие конька—лед происходит фрикционное тепло-выделение интенсивностью:

$$q = f_1 p v = f_1 \frac{N}{bl} v \text{ — при скольжении по инерции прямолинейного лезвия конька по льду;}$$

$$q(x) = f_2 p(x) v \text{ — при скольжении по инерции криволинейного лезвия конька по льду;}$$

$$q = f_3 p v = f_3 \frac{N^*}{A_r} v \text{ — при отталкивании.}$$

Очевидно, что N^* больше N на величину сил инерции, возникающих при отталкивании, а $f_1 < f_2 < f_3$.

На процессы теплопереноса в зоне контакта лезвие конька — лед существенное влияние оказывают температура льда и температура воздуха у поверхности льда, где находится конек во время между отталкиванием и очередным контактом со льдом.

В случае, когда температура воздуха отрицательная (рис. 2, а), фрикционное тепловыделение в виде удельных тепловых потоков распределяется между лезвием и льдом, т. е.

$$q = q_1 + q_2.$$

С боковых сторон лезвия конька в окружающую среду направлен тепловой поток

$$q_3 = \alpha (\vartheta_{\text{л}} - \vartheta_{\text{в}}).$$

Если при отрицательной температуре воздуха фрикционный нагрев и оплавление льда происходят под действием теплового потока q_1 , то при положительной температуре воздуха нагрев и оплавление льда происходят под действием суммарного теплового потока $q + q_2$ (рис. 2, б). Естественно, что $q + q_2 \gg q_1$. Это обстоятельство подчеркивает необходимость конструктивных отличий лезвий коньков для соревнований при отрицательной температуре воздуха (на открытых катках в морозную погоду) от лезвий коньков для соревнований при положительной температуре воздуха у поверхности льда (на закрытых катках, а также на открытых катках с искусственным охлаждением льда в теплую погоду).

На основе проведенного анализа можно высказать следующие предложения по улучшению условий скольжения конькобежных коньков по льду.

При соревнованиях на открытых катках в морозную погоду необходимо увеличивать интенсивность фрикционного нагрева льда q_1 за счет

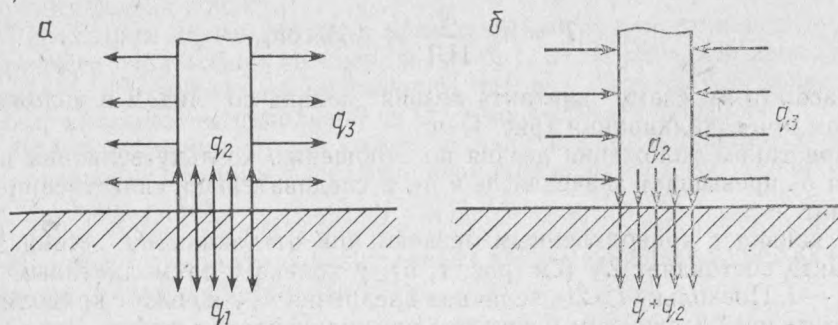


Рис. 2. Схема процесса теплопередачи при отрицательной (а) и положительной температуре воздуха (б).

увеличения фрикционного тепловыделения q путем уменьшения ширины b лезвия конька; уменьшения теплового потока q_2 ; путем теплоизоляции боковых сторон лезвия (уменьшения q_3).

При соревнованиях на закрытых катках с положительной температурой воздуха у поверхности льда целесообразно увеличить ширину криволинейного лезвия конька b (по сравнению с шириной прямолинейного лезвия), связав ее величину с профилем кривой контактной зоны

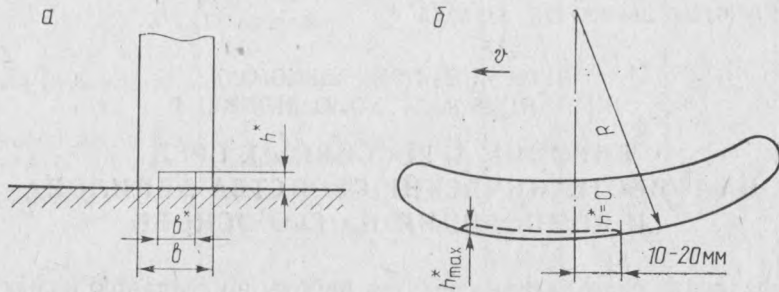


Рис. 3. Лезвие конька с канавкой (а) и расположение канавки на коньке (б)

конька (чем меньше радиус кривизны, тем больше b); уменьшить длину конька l .

На поверхности трения бегового конька с криволинейным лезвием может быть выполнена канавка (рис. 3, а) шириной b^* и глубиной h^* .

С позиции гидродинамической теории смазки канавку необходимо прорезать с переменной глубиной канавки h^* (10—20 мм) за середину контактной зоны конька (рис. 3, б).

У лезвия конька с канавкой радиус контактной зоны R должен быть больше, чем у конька без канавки (при одинаковых b).

Обозначения

N, N^* — нормальные нагрузки; v — скорость скольжения; f_1, f_2, f_3 — коэффициенты трения; T — сила трения; T_a, T_d — адгезионная и деформационная составляющие силы трения; τ — удельная адгезионная сила трения; τ_1, τ_2 — удельная адгезия лезвия со льдом и водой (напряжение вязкого сдвига); σ — нормальное напряжение на площадке $b \times h_1$; $HЛ$ — твердость льда; k — опытный коэффициент; l — длина контактной зоны прямолинейного лезвия; l_1 — длина участка в передней зоне прямолинейного лезвия; b — ширина лезвия; l_2 — длина контактной зоны у криволинейного лезвия; h_1, h_2, h_3 — глубина внедрения лезвия в лед; A_r — фактическая площадь контакта; x — координата в направлении скольжения; p — давление; $p_{ср}$ — среднее давление; q — интенсивность тепловыделения; q_1, q_2, q_3 — удельные тепловые потоки в лед, в лезвие и в окружающую среду с боковой поверхности лезвия; α — коэффициент теплоотдачи; ϑ_0 — начальная температура льда; $T_{пл}$ — температура плавления льда; $\vartheta_л, \vartheta_в$ — средняя температура лезвия конька и температура воздуха у поверхности льда; b^*, h^* — ширина и глубина канавки; R — радиус кривизны лезвия.

Summary

The friction interaction of ice and skates having rectilinear and curvilinear blades is considered. Frictional heat generation, ice heating and melting, water film formation are taken into account.

Литература

1. Балакин В. А. // Наука и жизнь. 1982. № 3. С. 110—111.
2. Балакин В. А., Смирнов В. Н., Переверзева О. В. // Трение и износ. 1988. Т. 9, № 2. С. 266—273.
3. Балакин В. А., Переверзева О. В. // Трение и износ. 1991. Т. 12, № 3. С. 540—551.